

8ª edición

Dirección de la producción y de operaciones

Decisiones tácticas

Jay Heizer
Barry Render

PEARSON
Prentice Hall

DIRECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DE OPERACIONES

DECISIONES TÁCTICAS

DIRECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DE OPERACIONES

DECISIONES TÁCTICAS

OCTAVA EDICIÓN

Jay Heizer
Jesse H. Jones Professor of Business Administration
Texas Lutheran University

Barry Render
Charles Harwood Professor of Operations Management
Crummer Graduate School of Business
Rollins College

Traducción:
Yago Moreno López
yagomoreno@blueyonder.co.uk

Revisión Técnica:
José Luis Martínez Parra
Universidad Autónoma de Barcelona



Madrid • México • Santafé de Bogotá • Buenos Aires • Caracas • Lima
Montevideo • San Juan • San José • Santiago • São Paulo • White Plains

Datos de catalogación bibliográfica

Jay Heizer y Barry Render
Dirección de la producción y de operaciones.
Decisiones tácticas, 8.ª edición

PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid, 2008

ISBN: 978-84-8322-361-1
Materia: Producción (Economía) 338

Formato 195 × 250 mm   Páginas: 560

C/ Ribera del Loira, 28
28042 Madrid

Jay Heizer, Barry Render
Dirección de la producción y de operaciones. Decisiones tácticas. 8.ª edición

Authorized translation from the English language edition, entitled OPERATIONS MANAGEMENT, 8th Edition by HEIZER, JAY; RENDER, BARRY, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall, Copyright © 2006.

ISBN: 978-84-8322-361-1
Depósito Legal: M.

Equipo editorial:
Editor: Alberto Cañizal
Técnico editorial: Elena Bazaco
Equipo de producción:
Director: José Antonio Clares
Técnico: José Antonio Hernán
Diseño de cubierta: Equipo de diseño de PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
Composición: JOSUR TRATAMIENTO DE TEXTOS, S. L.
Impreso por:

IMPRESO EN ESPAÑA - PRINTED IN SPAIN

Este libro ha sido impreso con papel y tintas ecológico

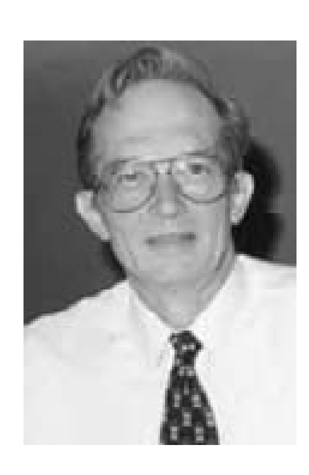
A Donna, Kira y Janée, en honor a las mujeres en que os habéis convertido

—JH

A mi familia

—BR

SOBRE LOS AUTORES



Jay Heizer ostenta la cátedra Jesse H. Jones Chair of Business Administration en la Texas Lutheran University en Senguin, Texas. Se licenció y obtuvo un master de la Universidad de North Texas y se doctoró en dirección y estadística en la Arizona State University (1969). Anteriormente ejerció como docente en la Universidad de Memphis, en la Universidad de Oklahoma, en la Virginia Commonwealth University y en la Universidad de Richmond. También ha sido profesor invitado en la Universidad de Boston, la Universidad George Mason, el Centro de Dirección Checo y la Universidad Otto-Von-Guericka University Magdeburg.

La experiencia industrial del doctor Heizer es muy amplia. Aprendió el lado práctico de la dirección de operaciones como aprendiz de maquinista en Foringer & Company, planificador de la producción en Westinghouse Airbrake y en General Dynamics, donde trabajó en ingeniería administrativa. Además, ha participado activamente en actividades de consultoría de dirección de operaciones y dirección de sistemas de información para diversas organizaciones, entre las que se encuentran Philip Morris, Firestone, Dixie Container Corporation, Columbia Industries y Tenneco. Tiene la certificación CPIM de la APICS, la Asociación de Dirección de Operaciones.

El catedrático Heizer es coautor de cinco libros y ha publicado más de treinta artículos sobre diversos temas relacionados con la dirección. Sus artículos han sido publicados en *Academy of Management Journal, Journal of Purchasing, Personnel Psychology, Production & Inventory Control Management, APICS-the Performance Advantage, Journal of Management History, IIE Solutions y Engineering Management,* entre otras publicaciones. Ha ejercido la docencia de cursos de dirección de operaciones para estudiantes universitarios, estudios de postgrado y ejecutivos.



Barry Render ejerce la cátedra Charles Harwood Endowed Professorship en Dirección de Operaciones en el Crummer Graduate School of Business del Rollins College, en Winter Park, Florida. Se licenció en matemáticas y física en la Universidad Roosevelt, obteniendo un postgrado en Investigación de Operaciones y un doctorado en Análisis Cuantitativo en la Universidad de Cincinnati. Anteriormente ejerció la docencia en la Universidad George Washington, la Universidad de Nueva Orleáns, la Universidad de Boston y la Universidad George Mason, donde ejerció la cátedra GM Foundation Professorship en Ciencias de la Decisión y fue Director del Departamento de Ciencias de la Decisión. El doctor Render también ha trabajado en la industria aeroespacial para General Electric, McDonnell Douglas y la NASA.

El catedrático Render es coautor de diez manuales publicados por Prentice Hall, entre ellos *Managerial Decision Modeling with Spreadsheets, Quantitative Analysis for Management, Service Management, Introduction to Management Science* y *Cases and Readings in Management Science. Quantitative Analysis for Management* está ahora en su novena edición, y es el manual líder en esa disciplina, tanto en Estados Unidos como en el resto del mundo. Sus más de cien artículos sobre diversos temas relacionados con la dirección han sido publicados en revistas como *Decision Sciences, Production and Operations Management, Interfaces, Information and Management, Journal of Management Information Systems, Socio-Economic Planning Sciences, IIE Solutions* y *Operations Management Review,* entre otras.

El doctor Render también ha sido galardonado como AACSB Fellow y ha sido nombrado en dos ocasiones Senior Fullbright Scholar. Ha sido Vicepresidente del Decision Science Institute Southwest Region y ha sido Software Review Editor de *Decision Line* durante seis años. También ha sido editor de los números especiales de Dirección de Operaciones del *New York Times* de 1996 a 2001. Finalmente, el catedrático Render ha participado de forma activa en tareas de consultoría para organismos gubernamentales y muchas empresas, entre las que se encuentran NASA, FBI, U.S. Navy, Fairfax County, Virginia, y C&P Telephone.

Ejerce la docencia de cursos de dirección de operaciones en los programas de MBA y Executive MBA del Rollins College. Ha sido galardonado como Catedrático del Año y recientemente fue elegido por la Universidad Roosevelt para ser galardonado con el premio St. Claire Drake Award for Outstanding Scholarship.

Resumen del contenido

DIRECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DE OPERACIONES

Decisiones tácticas

Contenido

PARTE II: MÓDULOS CUANTITATIVOS

Tutoriales del CD-ROM

Prólogo

Bienvenidos a su curso de dirección de operaciones. En este manual presentamos una perspectiva puntera de las actividades de la función de operaciones. Las operaciones constituyen una interesante área de la dirección que tiene un profundo efecto sobre la productividad, tanto en las manufacturas como en los servicios. En efecto, pocas actividades influyen tanto sobre la calidad de nuestra vida. El objetivo de este manual es presentar una amplia introducción al campo de las operaciones de forma práctica y realista. La dirección de operaciones incluye una mezcla de temas de la contabilidad, la ingeniería industrial, la dirección, la ciencia directiva y la estadística. Incluso si no piensa desarrollar su carrera en el área de las operaciones, es probable que tenga relaciones con profesionales de dicha área. Este libro también le ayudará a comprender cómo afecta la dirección de operaciones a la sociedad y a su vida. Sin duda, comprenderá mejor lo que ocurre entre bastidores cuando cene en Hard Rock Café, haga un pedido en Amazon.com, compre un PC personalizado a Dell Computer en Internet o acuda al Hospital Arnold Palmer para recibir atención sanitaria.

Aunque muchos de nuestros lectores no son estudiantes de dirección de operaciones, sabemos que muchos estudiantes de marketing, finanzas, contabilidad y MIS encontrarán el material tanto interesante como útil porque desarrollamos un conocimiento fundamental sobre la empresa. Más de 400.000 lectores de las ediciones anteriores parecen respaldar esta afirmación.

ENFOQUE DE LA NUEVA EDICIÓN

La nueva edición sigue prestando una atención especial a facetas importantes de la dirección de operaciones, que comprende:

- **Estrategia y ética:** como temas unificadores en todos los capítulos.
- **Operaciones globales:** y cómo afectan al producto y al diseño del proceso, la localización, los recursos humanos y otras cuestiones.
- **Operaciones en los servicios:** reconociendo la proporción dominante de puestos de trabajo y decisiones de operaciones en los servicios.
- **Programas informáticos para la dirección de operaciones:** nuestro complemento gratuito Excel OM, POM para Windows y Lekin® Flexible Job Shop Scheduling System vienen incluidos en el CD-ROM que acompaña al texto. También se puede obtener Microsoft Project 2003 en un CD gratuito separado previa solicitud.
- **Cobertura de temáticas modernas:** con cobertura de las cadenas de suministros, Sigma Seis, Internet, Microsoft Project, comercio electrónico, planificación de los recursos de la empresa, gestión del rendimiento y personalización en masa.
- **Ejemplos del mundo real en la dirección de operaciones:** para maximizar el interés y el entusiasmo de los alumnos.
- **Ejercicios Active Model:** para utilizar hojas de cálculo interactivas de Excel de ejemplos en el libro y análisis de cuestiones hipotéticas.

NUEVO EN ESTA EDICIÓN

Integración de servicios con el Hospital Arnold Palmer y siete nuevos casos de estudio en vídeo En esta edición ilustramos cómo se aplica en la práctica la dirección de operaciones en el Hospital Arnold Palmer, uno de los mejores hospitales del mundo. El Hospital Arnold Palmer nos ha invitado a grabar "entre bastidores" las funciones de operaciones de su organización, lo que permite a los alumnos tener una perspectiva interna de cuestiones como la dirección de proyectos, la calidad, el análisis de procesos, la planificación de la capacidad, la disposición de las instalaciones, la gestión de la cadena de suministros y la gestión de inventarios con un sistema de justo a tiempo. Esta interesante y renovada organización, ubicada en Orlando, Florida, pone el énfasis en las operaciones en un entorno de servicios y se ilustra a lo largo del manual con ejemplos, fotografías, casos en vídeo y un perfil de empresa global en el Capítulo 6. Los profesores que adopten este manual como libro de texto tienen disponible una cinta VHS o un DVD que incluye siete episodios de entre ocho y diez minutos de cada tema. El CD-ROM del alumno también incluye una versión de 2 minutos de cada uno de estos vídeos. Los vídeos acaban de recibir importantes premios en la convocatoria anual de los Telly Award Competitions. De 10.000 candidatos, el vídeo sobre Calidad fue elegido Ganador y el vídeo sobre Análisis de Procesos fue elegido Finalista.

Nuestra edición anterior se centraba en el caso de Hard Rock Café, uno de los nombres más famosos del mundo. Los siete casos de estudio en vídeo creados para Hard Rock también aparecen en esta edición, o que hace que la combinación de los casos de Hard Rock y del Hospital Arnold Palmer sean la forma perfecta de integrar los servicios en un curso de dirección de operaciones.



Caso de estudio en vídeo

La cadena de suministros del Hospital Arnold Palmer

Preguntas para el debate*

Material de problemas a resolver en casa Este manual es reconocido por su amplio espectro de materiales que se pueden asignar como deberes a realizar en casa. Ofrecemos Ejercicios Active Model, Cuestiones para el Debate, Problemas, Problemas en Internet, Casos de Estudio, Casos de Estudio en Internet y Casos de Estudio en Vídeo. Con esta edición incorporamos las cinco siguientes características nuevas:

1. **Ética en la dirección de operaciones.** La toma de decisiones éticas es ahora más importante que nunca en nuestro dinámico e interesante campo de estudio. Los directores de operaciones, como otros altos ejecutivos, tienen que tomar una gran cantidad de decisiones difíciles que ponen a prueba su ética todos los días. Cada capítulo ofrece un nuevo recuadro sobre un "Dilema Ético" y la mayoría de los capítulos también ofrecen un análisis más integrado de las cuestiones éticas. Estos ejercicios constituyen la forma ideal de hacer pensar y debatir este tema.



DILEMA ÉTICO

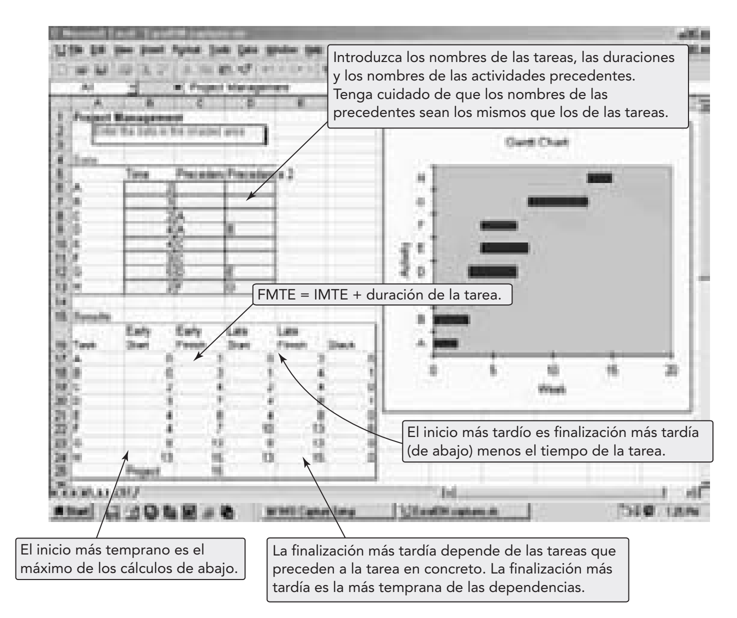
Durante generaciones, la política de Sears Roebuck & Company, el abuelo de los minoristas, fue no comprar más del 50 por ciento de la producción de cualquiera de sus proveedores. El razonamiento subyacente era que esta política permitía a Sears moverse a otros proveedores, según dictase el mercado, sin destruir la capacidad del proveedor de seguir en activo. Por el contrario, Wal Mart compra una proporción cada vez mayor de la producción de sus proveedores. Con el tiempo, se puede esperar que Wal-Mart se siente a hablar con ese proveedor y le explique que ya no necesita disponer de vendedores y que debe eliminar su plantilla de vendedores y trasladar los ahorros de costes a Wal-Mart.

Sears está perdiendo cuota de mercado, ha sido comprada por K-Mart y está recortando puestos de trabajo; Wal-Mart está ganando cuota de mercado y contratando. ¿Cuáles son los problemas éticos y cuál de estas empresas tiene una postura más ética?

2. **Nuevos problemas más estimulantes.** Una de las características distintivas de nuestro manual siempre ha sido la gran oferta de ejemplos, problemas resueltos, problemas en Internet y problemas para resolver en casa. Nuestros 763 problemas para resolver en casa brindan la oferta de problemas más grande, más clara, y ahora más diversa, de cualquier manual de dirección de operaciones. En esta edición hemos elevado nuestra clasificación de 1, 2 o 3 puntos de dificultad de los problemas a un sistema de 1, 2, 3 y 4 puntos de dificultad, añadiendo a cada capítulo nuevos problemas de cuatro puntos más estimulantes. Estos nuevos problemas para resolver en casa están diseñados para estimular la reflexión del alumno.

3. **Hojas de datos de Excel.** La dirección de operaciones es un campo ideal en el que el análisis de las hojas de cálculo ayuda a encontrar la mejor solución a un problema. Excel OM, nuestro complemento de Excel, se encuentra en el CD-ROM del alumno y puede utilizarse para abordar muchos de los problemas de este manual. Pero muchos profesores prefieren que sean los alumnos los que construyan sus propios modelos en Excel. Como nueva característica de este manual, se ofrecen ejemplos sobre cómo hacerlo.

A lo largo del manual se pueden encontrar otros ejercicios de construcción de modelos con Excel.



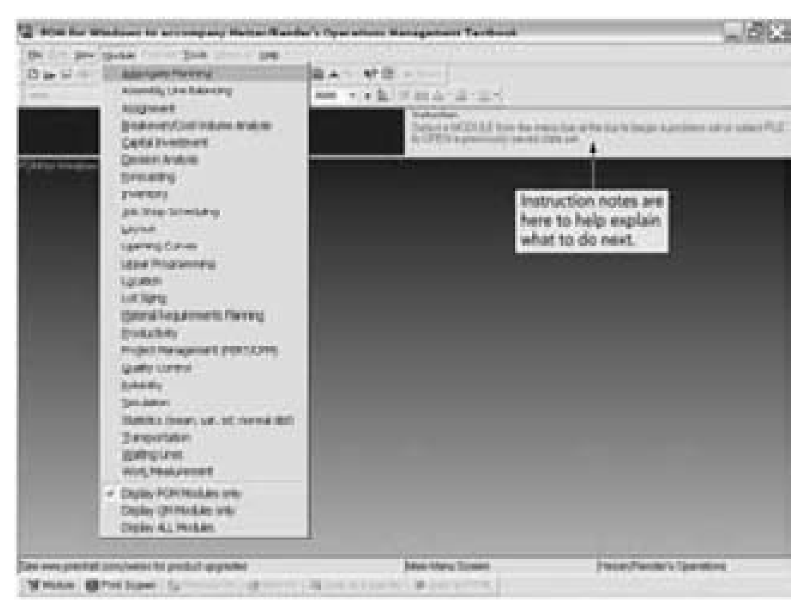
PROGRAMA 3.8 ■ Utilización de Excel Om con los datos de Milwaukee Paper Manufacturing de los Ejemplos 4 y 5

4. OneKey con PH Grade Assist. OneKey proporciona un sitio de fácil utilización para todos los recursos digitales disponibles con nuestro manual, incluyendo nuestra potente nueva opción *homework/exam* denominada PH Grade Assist. Con PH Grade Assist se pueden asignar ahora online muchos de los problemas de este manual y de los problemas/preguntas de nuestro archivo Test Item File. Con docenas de opciones para hacer que la secuencia, el momento y las cifras sean aleatorios, PH Grade Assist hace que sea más fácil diseñar y calificar los deberes para hacer en casa y los exámenes. Las cifras de estos problemas también han sido convertidas por los autores a un formato “algorítmico”, lo que significa que hay numerosas versiones (a veces centenares) de cada problema, con datos distintos para cada alumno. Si el profesor lo desea, puede entregar las soluciones a cada problema y su conjunto de datos a los alumnos inmediatamente después de haber resuelto el problema. La calificación obtenida por el alumno es registrada automáticamente por el software en el cuaderno de notas del profesor.

5. Ejercicios sobre toma de decisiones. En el CD del profesor hay cuatro nuevos ejercicios para el aula, junto con sus archivos de datos. El primero es un ejercicio de MSProject diseñado como una ampliación del caso de estudio en vídeo “Dirección del festival Rockfest de Hard Rock Café” (Capítulo 3). El segundo es una simulación en Excel de un juego de dirección de proyectos denominado Rock’n Bands. El tercero es un juego de dados para el control estadístico de procesos (Suplemento 6). El cuarto es una simulación de inventarios, también en Excel, llamada “He Shoots, He Scores” (Capítulos 2 y 4 del volumen *Decisiones Tácticas*).

POM para Windows se incluye gratuitamente en todos los CD del alumno POM para Windows, que lleva mucho tiempo siendo el principal programa informático de ayuda para la toma de decisiones de dirección de operaciones, está ahora disponible, *gratis*,

en todos los CD-ROM del alumno. A continuación se muestran los 24 programas de dirección de operaciones de POM para Windows. Todos los problemas del final de los capítulos que se pueden resolver con este programa están marcados con una ***P***. Con esta incorporación, el manual ofrece ahora dos elecciones de software para resolver los problemas: POM para Windows y Excel OM.



PROGRAMA IV.2 ■ POM para Windows lista de operaciones

CAMBIOS DE CADA CAPÍTULO

Para destacar hasta qué punto se ha revisado la edición anterior, he aquí unos pocos cambios capítulo a capítulo. Hay cinco capítulos que se han redactado de nuevo casi por completo: Dirección de la Calidad (Capítulo 6 de *Decisiones Estratégicas*), Estrategia de Procesos (Capítulo 7 de *Decisiones Estratégicas*), Gestión de la Cadena de Suministros (Capítulo 1 de *Decisiones Tácticas*), Gestión de la Cadena de Suministros (Capítulo 2 de *Decisiones Tácticas*) y Programación a Corto Plazo (Capítulo 5 de *Decisiones Tácticas*). En cada capítulo hay un nuevo ejercicio sobre un Dilema Ético.

Capítulo 1 de *Decisiones Tácticas*: Gestión de la cadena de suministros. Este capítulo ha sido sometido a una importante revisión y nuevas incorporaciones, incluyendo una nueva Figura 1,1 que ilustra la cadena de suministros de la cerveza, con una amplia nueva cobertura de la contratación externa, incluyendo un recuadro sobre *dirección de operaciones en acción* titulado "Externalización, no a la India, sino a lugares remotos de Estados Unidos", una sección sobre ética en la cadena de suministros que incluye principios de conducta del Institute for Supply Management, nueva materia sobre la integración vertical, un nuevo recuadro sobre la *dirección de operaciones en acciones* sobre la cadena de suministros de Penney en Taiwán para las camisetas, amplia cobertura de las compras por Internet, y una sección denominada "Logística, seguridad y sistemas justo a tiempo". Finalmente hemos añadido un nuevo caso de estudio en vídeo denominado "La cadena de suministros del Hospital Arnold Palmer".

Suplemento al Capítulo 1 de *Decisiones Tácticas*: Comercio electrónico y dirección de operaciones. Hemos actualizado este suplemento de actualidad con una nueva sección sobre direcciones de proyectos en colaboración, nuevo material sobre el modelo de comercio de empresa a empresa de Ariba, y un nuevo recuadro sobre *dirección de operaciones en acción* denominado "Las subastas on line de Mars ganan al juego de los envíos".

Capítulo 2 de *Decisiones Tácticas*: Gestión del inventario. Incluimos material para crear sus propias hojas de datos Excel para los inventarios. La nueva sección sobre modelos probabilísticos y stock de seguridad incluye una amplia cobertura del inventario probabilista, que comprende modelos en los que (1) la denuncia es variable y el tiempo de entrega es constante, (2) sólo el tiempo de entrega es variable, y (3) tanto la demanda como los plazos de entrega son variables. Hay tres nuevos ejemplos, dos nuevos problemas resueltos, y cuatro nuevos problemas para resolver en casa, incluyendo un problema con la dificultad de cuatro puntos. También hemos añadido un nuevo recuadro sobre *dirección de operaciones en acción* sobre el nuevo sistema nacional de Anheuser-Busch para controlar los inventarios, y un nuevo caso de estudio sobre Zhou Cicycle Company. Finalmente, en el CD del profesor se incluye un juego de simulación de inventarios llamado "He Shoots, He Scores".

Capítulo 3 de *Decisiones Tácticas*: Planificación agregada. Se tratan con más detalle las Figuras 3.5 y 3.6 sobre gestión del rendimiento.

Capítulo 4 de *Decisiones Tácticas*: Planificación de las necesidades de materiales y planificación de los recursos de la empresa. Hemos añadido tres nuevas preguntas para el debate y dos nuevos problemas estimulantes de cuatro puntos. También hemos añadido temas sobre la programación con capacidad finita y los "supermercados" (que están relacionados con la planificación de las necesidades de materiales y los sistemas justo a tiempo), ampliando la cobertura de la planificación de los recursos de la empresa de SAP.

Capítulo 5 de *Decisiones Tácticas*: Programación a corto plazo. La relación entre planificación de la capacidad, planificación agregada, programa marco y planificación a corto plazo representada básicamente en la nueva Figura 5.1. Ahora explicamos cómo los cuatro procesos distintos sugieren distintos enfoques sobre la programación (Tabla 5.2), hemos añadido el tema de las tarjetas ConWIP, aumenta la cobertura de la programación con capacidad finita, incorporando el software Lekin (para la programación con capacidad finita) en nuestro CD-ROM, y ampliando el material sobre la teoría de las restricciones, incluyendo el tambor, el amortiguador y la cuerda. La sección sobre programación cíclica (Ejemplo 8) junto con dos nuevos problemas sobre el tema.

Capítulo 6 de *Decisiones Tácticas*: Sistemas justo a tiempo y de producción enjuta. Hemos ampliado la cobertura sobre el sistema de producción de Toyota y añadido los temas relativos a las 5 S y a los siete desperdicios. El nuevo caso de estudio en vídeo aborda el sistema justo a tiempo en el Hospital Arnold Palmer.

Capítulo 7 de *Decisiones Tácticas*: Mantenimiento y fiabilidad. El nuevo Perfil de una empresa global de este capítulo hace referencia a la Comisión de Suministros Eléctricos de Orlando, calificada como mejor sistema de distribución eléctrica del sudeste de Estados Unidos.

Módulo cuantitativo A: Herramientas para la toma de decisiones. Hay una nueva sección sobre la utilización de los árboles de decisión en la toma de decisiones éticas, incluyendo un ejemplo (Ejemplo 8). También se ha añadido un nuevo problema estimulante calificado con cuatro puntos de dificultad.

Módulo cuantitativo B: Programación lineal. Se describe con detalle la herramiento Solver de Excel como herramienta para resolver problemas de programación lineal, y se ha añadido un nuevo problema de cuatro puntos de dificultad.

Módulo cuantitativo C: Modelos de transporte. Se añade un problema de cuatro puntos de dificultad.

Módulo cuantitativo D: Modelos de colas. El caso sobre New England Foundry es una versión actualizada del caso sobre New England Casting que redactamos hace muchos años, y hemos añadido un nuevo problema y un problema de cuatro puntos de dificultad.

Módulo cuantitativo E: Curvas de aprendizaje. Sin cambios.

Módulo cuantitativo F: Simulación. Hemos ampliado la sección sobre utilización de hojas de cálculo de Excel que muestran a los alumnos cómo crear sus propias fórmulas, y hemos añadido un nuevo problema de cuatro puntos (más difícil).

Tutoriales en el CD-ROM. Hay cinco pequeños capítulos de la edición que no han cambiado. Los capítulos son Tutorial 1, Herramientas estadísticas para directivos; Tutorial 2, Muestreo de aceptación; Tutorial 3, El método del Simplex en la programación lineal; Tutorial 4, Los métodos MODI y VAM para resolver los problemas de transporte; Tutorial 5, Rutas y programación de vehículos.

CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS

Nuestro objetivo consiste en ofrecer a los alumnos los medios pedagógicos más refinados para ayudar a mejorar el aprendizaje y la docencia.

- **Equilibrio entre servicios y manufacturas.** Los ejemplos sobre servicios y manufacturas son críticos para un curso de dirección de operaciones. Hemos combinado cuidadosamente los dos a lo largo del manual. Para destacar cada campo, hemos hecho un seguimiento de dos organizaciones manufactureras, una cadena de restaurantes, un hospital y una universidad: Regal Marine (tres casos en vídeo y un perfil de una empresa global en el Capítulo 5 de *Decisiones Estratégicas)*; Wheeled Coach (cuatro casos en vídeo y un perfil de una empresa global en el Capítulo 4 de *Decisiones Tácticas*); Hard Rock Café (siete casos en vídeo y un perfil de una empresa global en el Capítulo 1 de *Decisiones Estratégicas*); el Hospital Arnold Palmer (siete casos en vídeo y un perfil de una empresa global en el Capítulo 6 de *Decisiones Estratégicas*); Southwestern University (siete casos de vídeo integrados sobre esta universidad de ficción). Además, ofrecemos cientos de otros ejemplos de empresas de servicios y manufactureras a lo largo del texto, los ejemplos y los problemas para resolver en casa.
- **Ejemplos resueltos.** Los ejemplos de problemas de dirección de operaciones, resueltos paso a paso, resultan extremadamente útiles en un curso analítico como éste. Los capítulos incluyen 141 ejemplos, que son reforzados con 66 problemas resueltos al final de los capítulos. Además, el CD del alumno y el sitio web del manual incluyen más de 100 problemas prácticos.
- **Excelentes problemas para resolver en casa.** Como manual líder sobre dirección de operaciones, nos enorgullecemos de tener el mayor conjunto de problemas para resolver en casa. Los 597 problemas del texto tienen una codificación del grado de dificultad de cuatro puntos. Estos problemas están complementados con 166 problemas adicionales en el sitio web del manual. Las soluciones a todos estos problemas se encuentran en el manual de soluciones del profesor redactado por los autores.

- **Perfiles de una empresa global.** Cada capítulo se inicia con un análisis de dos páginas a todo color de una organización global líder. Entre éstas se incluye a Amazon, Volkswagen, Dell, el Hospital Arnold Palmer, Delta Airlines, McDonald's, Boeing y muchas más.

PERFIL DE UNA EMPRESA GLOBAL: BOEING

La estrategia global de Boeing genera una ventaja competitiva

Con el diseño de vanguardia del 787, un interior más espacioso y proveedores globales, Boeing está consiguiendo ventas en todo el mundo.

La tecnología de colaboración de Boeing permite un "espacio de trabajo virtual" que permite que los ingenieros del 787, incluidos sus socios en Australia, Japón, Italia, Canadá y todo Estados Unidos, hagan cambios del diseño simultáneamente en tiempo real

La estrategia del 787 Dreamliner de Boeing es única, tanto desde un punto de vista global como desde un punto de vista de ingeniería.

El Dreamliner incorpora muchas de las últimas tecnologías de la industria aeroespacial, desde el diseño del armazón y del motor del avión, hasta laminados superligeros de grafito de titanio, fibra de carbón y epoxi, y compuestos. Otra innovación es el sistema de supervisión electrónico que permite que el aeroplano envíe necesidades de mantenimiento a sistemas informáticos en tierra. Boeing también está trabajando con General Electric y Rolls-Royce para desarrollar motores más eficientes. Los avances esperados en tecnología de motores contribuirán con hasta un 8 por ciento de mayor eficiencia de combustible/carga del nuevo aeroplano, lo que representa un salto de casi dos generaciones en tecnología.

Este Boeing 787 de última tecnología también es global. Liderado por Boeing desde sus instalaciones de Everett, Washington, un equipo internacional de empresas del sector aeroespacial desarrolló el avión. Nue-

- **Recuadros sobre dirección de operaciones en acción.** Se han extraído 58 ejemplos de media página de prácticas recientes de dirección de operaciones de diversas fuentes, incluyendo *The Wall Street Journal, New York Times, Fortune, Forbes* y *Harvard Business Review*. Estos recuadros dan vida a la dirección de operaciones.

DIRECCIÓN DE OPERACIONES EN ACCIÓN

PREVISIÓN EN DISNEY WORLD

Cuando el Consejero Delegado de Disney, Robert Iger, recibe el informe diario de sus grandes parques temáticos en Orlando, Florida, el informe sólo incluye dos cifras: la *previsión* de público ayer en los parques (Magic Kingdom, Epcot, Animal Kingdom, MGM Studios y Blizzard Beach) y la cantidad *real* de público. Se espera un error próximo a cero (utilizando como indicador el EPAM). Iger se toma muy en serio sus previsiones.

El equipo de previsiones de Disney World no hace, sin embargo, una única predicción diaria, y además Iger no es su único consumidor. El equipo también elabora previsiones diarias, semanales, mensuales, anuales y quinquenales para la dirección de recursos humanos, mantenimiento, operaciones, finanzas y para el departamento de programación de parques. Los que las hacen utilizan modelos de juicios de valor, modelos econométricos, modelos de medidas móviles y análisis de regresión. La previsión anual realizada por el equipo en 1999 sobre el volumen total de público para el año 2000 obtuvo un EPAM de 0.

Puesto que el 20 por ciento de los clientes de Disney World proviene de fuera de Estados Unidos, su modelo económico incluye variables como el índice de confianza del consumidor y el producto nacional bruto de siete países. Disney también encuesta a un millón de personas todos los años para analizar sus planes futuros de viaje y sus experiencias en los parques. Esto ayudará a hacer previsiones, no sólo de la cantidad de público, sino del comportamiento en cada atracción (cuánto tiempo está dispuesta la gente a esperar en la cola y cuántas veces se subirá a una atracción). Inputs para el modelo de previsión mensual son las ofertas especiales de las compañías aéreas, los discursos del presidente de la Reserva Federal, y las tendencias de Wall Street. Disney hace incluso un seguimiento de 3.000 distritos escolares dentro y fuera de Estados Unidos para saber las fechas de las vacaciones y festivos.

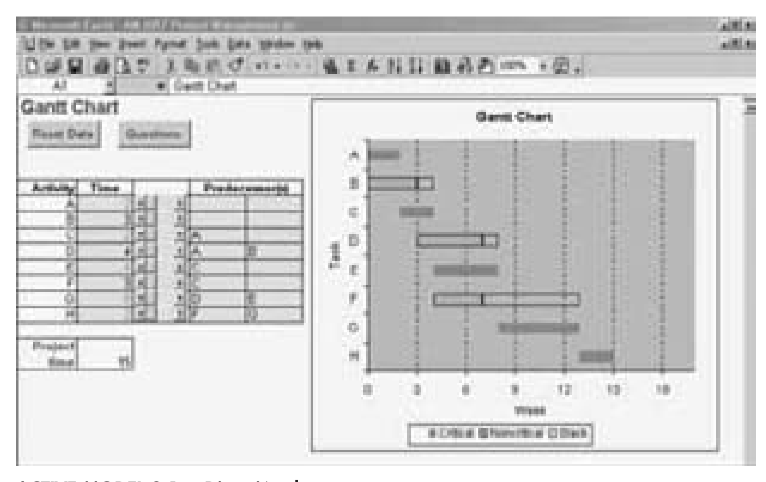
Fuente: J. Newkirk y M. Haskell, "Forecasting in the Service Sector", presentación en la duodécima reunión anual de la Production and Operations Management Society, 1 de abril de 2001, Orlando, FL.

- **Ejercicios Active Model.** Los ejercicios Active Model son hojas de cálculo interactivas de Excel de ejemplos del manual que permiten al alumno analizar y comprender mejor estos importantes conceptos cuantitativos. Los alumnos y los profesores pueden ajustar los datos de entrada del modelo y, en efecto, responder a toda una serie de preguntas hipotéticas (por ejemplo, ¿qué pasaría si una actividad de una red PERT tardara tres días más? Capítulo 3 de *Decisiones Estratégicas*. ¿Qué pasaría si se duplicara el coste de mantenimiento o la demanda en un modelo de inventarios? Capítulo 2 de *Decisiones Tácticas*. ¿Qué ocurre si la constante del suavizado exponencial es 0,3 en vez de 0,5? Capítulo 4 de *Decisiones Estratégicas*). Estos ejercicios Active Model son excelentes para las presentaciones en el aula y/o como deberes para hacer en casa. Se incluyen 28 ejercicios de este tipo en el CD-ROM del alumno, y muchos aparecen en el texto.



EJERCICIO ACTIVE MODEL

Milwaukee Paper Manufacturing. Este ejercicio Active Model le permite evaluar cambios en importantes elementos de la red del hospital que hemos visto en el capítulo, utilizando su CD-ROM. *Véase* Active Model 3.1.



ACTIVE MODEL 3.1 ■ Dirección de proyectos

Otros recursos para el alumno incluyen las notas y definiciones en los márgenes y las soluciones a los problemas pares.

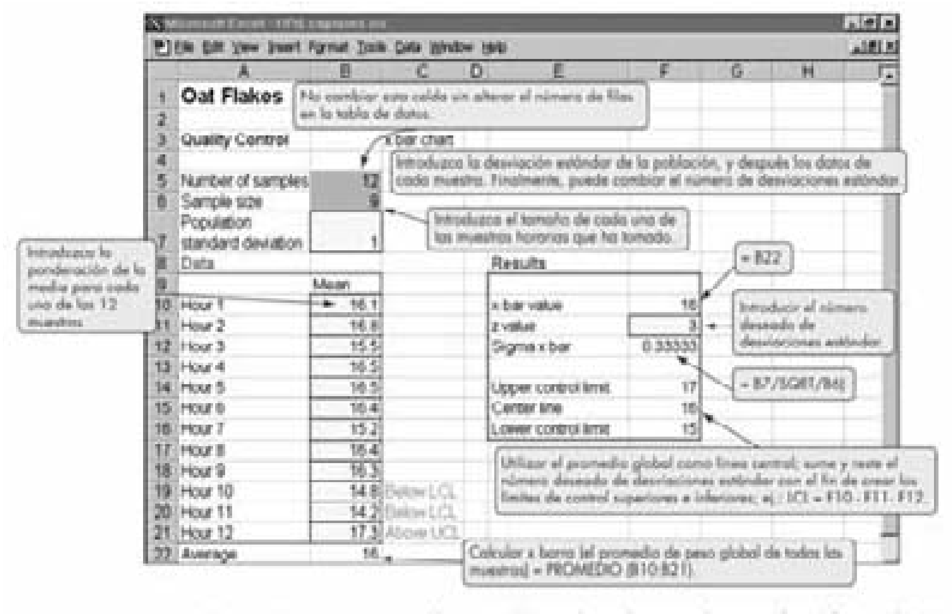
CD-ROM DEL ALUMNO GRATIS CON CADA MANUAL

Cada nueva copia de este manual incluye un CD-ROM del alumno que contiene estimulantes recursos para avivar el curso y ayudar a los alumnos a aprender.

- **Lecciones en PowerPoint.** A partir de un amplio conjunto de más de 1.000 diapositivas actualizadas de PowerPoint, estas notas para las clases ofrecen un refuerzo de los puntos principales de cada capítulo, y permiten a los alumnos revisar el material del capítulo. Se han vuelto a diseñar todas las diapositivas para mejorar la claridad.
- **Veintidós interesantes casos en vídeo.** Estos casos en vídeo muestran a empresas reales (Regal Marine, Hard Rock Café, Ritz Carlton, Wheeled Coach y el Hospital Arnold Palmer) y permiten a los alumnos ver pequeños videoclips, leer los temas clave, responder a las preguntas y enviar por correo electrónico sus respuestas al pro-

fesor. Estos casos de estudio también pueden encomendarse como deberes sin utilizar el tiempo de la clase para mostrar los vídeos. Cada uno ha sido desarrollado y redactado por los autores del manual para complementar de forma específica el contenido del libro.

- **Videoclips del CD-ROM.** Otra nueva característica del CD-ROM son los 34 vídeos de uno a dos minutos que aparecen a lo largo de todo el manual y que están indicados en los márgenes. Estos videoclips ilustran temas relacionados con los capítulos, con vídeos sobre Harley-Davidson, Ritz Carlton, Hard Rock Café y otras empresas.
- **Ejercicios Active Model.** Los 28 ejercicios Active Model, descritos anteriormente, aparecen en archivos del CD-ROM del alumno. En la mayoría de los capítulos del manual se ofrecen muestras de estos modelos.
- **Problemas prácticos.** Ofrecen experiencia en la resolución de problemas. Complementan los ejemplos y problemas resueltos que aparecen en cada capítulo.
- **Preguntas de autoevaluación.** En cada capítulo se ofrece un vínculo a nuestro sitio web que acompaña al manual, donde estas preguntas permiten a los alumnos probar su comprensión de cada tema. También se puede acceder a través de este sitio web a giras por fábricas.
- **Software POM para Windows.** POM para Windows es una potente herramienta para resolver fácilmente problemas de dirección de operaciones. Se pueden utilizar sus 24 módulos para resolver la mayoría de los problemas que aparecen al final de los capítulos.
- **Software para la resolución de problemas.** Excel OM es nuestro complemento exclusivo, de fácil manejo, para Excel. Excel OM crea de forma automática hojas de cálculo para modelizar y resolver problemas. Los usuarios eligen un tema de un menú desplegable, rellenan los datos y a continuación Excel mostrará y representará gráficamente (cuando sea pertinente) los resultados. Este software es excelente para ayudar a los alumnos a resolver los problemas en casa, para hacer análisis hipotéticos, o para demostraciones en el aula.



PROGRAMA S6.2 ■ Datos en Excel OM y algunas fórmulas para los cereales del Ejemplo S1

- **Archivos de datos para Excel OM.** Los ejemplos del manual que se pueden resolver con Excel OM se encuentran en archivos de datos del CD-ROM. Están identificados con un icono en el margen del texto.
- **Capítulos adicionales en el CD-ROM.** Se ofrecen como material los siguientes capítulos adicionales: *Statistical Tools for Managers, Acceptance Sampling, The Simplex Method of Linear Programming, The MODI and VAM Methods of Solving Transportation Problems* y *Vehicle Routing and Scheduling*.
- **Microsoft Project 2003.** MSProject, el programa informático más potente y popular de la dirección de proyectos, está ahora disponible en un segundo CD-ROM del alumno (free Value-Pack). Esta versión queda documentada en el Capítulo 3 y está activada para que funcione durante 120 días.

RECURSOS PARA EL PROFESOR

Archivo de temas de examen El archivo de temas de examen (*Test Item File*), ampliamente actualizado por el catedrático L. Wayne Shell, incluye una serie de preguntas de tipo verdadero/falso, test, rellene el espacio en blanco, breve respuesta y resolución de problemas para cada capítulo. Los profesores también pueden descargar este archivo del sitio web acompañante de Prentice Hall en **http://www.prenhall.com/heizer**.

Nuevo software TestGen Los bancos de exámenes *Test Banks* están diseñados para utilizarlos con el software de generación de exámenes TestGen. Este paquete informático permite al profesor diseñar, guardar y crear exámenes para la clase de forma personalizada. El programa de exámenes permite a los profesores editar, añadir o borrar preguntas del banco de exámenes; editar gráficos existentes y crear nuevos gráficos; analizar los resultados; y organizar una base de datos de exámenes y resultados de los alumnos. Este nuevo software permite una mayor flexibilidad y facilidad de uso. Ofrece muchas opciones para organizar y presentar los exámenes, además de una herramienta de búsqueda y clasificación.

Manual de soluciones para el profesor El manual de soluciones para el profesor, redactado por los autores, incluye respuestas a todas las preguntas, dilemas éticos, ejercicios Active Model y casos de estudio del manual, así como soluciones paso a paso a todos los problemas del final del capítulo, los problemas de Internet y los casos de estudio en Internet. Los profesores también pueden descargar el manual de soluciones del sitio web acompañante de Prentice Hall en **http://www.prenhall.com/heizer.**

Presentaciones en PowerPoint Un amplio conjunto de nuevas presentaciones en PowerPoint, creadas por el catedrático Jeff Heyl de la Universidad Lincoln, está disponible en cada capítulo. Con más de 2.000 diapositivas, el catedrático Heyl ha creado este nuevo conjunto de diapositivas con excelente claridad y color. También hemos incluido cientos de diapositivas del sistema de respuesta personal, creado por el catedrático Bill Swart de la Universidad de East Carolina, ofreciendo análisis y ejercicios interactivos. Estas diapositivas también se pueden descargar del sitio web acompañante de Prentice Hall en **http://www.prenhall.com/heizer**.

Manual de recursos para el profesor El manual de recursos del profesor, actualizado por el catedrático Jeff Heyl, incluye muchos recursos útiles para el profesor: sumarios del curso, notas sobre vídeos, ejercicios en Internet, recursos docentes adicionales y notas docentes. Los profesores también pueden descargar el manual de recursos para el profesor del sitio web acompañante de Prentice Hall en **http://www.prenhall.com/heizer.**

CD-ROM de recursos para el profesor El CD-ROM de recursos para el profesor también ofrece archivos electrónicos de todo el manual de soluciones del profesor (en MS Word), presentaciones PowerPoint, Test Item File (en MS Word) y el banco de exámenes informatizado (TestGen). Estos archivos también se pueden descargar de la página Instructor Catalog.

Paquetes de vídeos Diseñados específicamente para los manuales Heizer/Render, los paquetes de vídeos incluyen los siguientes 32 vídeos:

- Dirección de operaciones en Hard Rock (Cap. 1 de *Decisiones Estratégicas*)
- Una gira por la fábrica de Winnebago Industries (Cap. 1 de *Decisiones Estratégicas*)
- Regal Marine: Estrategia de operaciones (Cap. 2 de *Decisiones Estratégicas*)
- La estrategia global de Hard Rock Café (Cap. 2 de *Decisiones Estratégicas*)
- Revisión de la dirección de operaciones y de la estrategia de Whirlpool (Cap. 2 de *Decisiones Estratégicas*)
- Dirección de proyectos en el Hospital Arnold Palmer (Cap. 3 de *Decisiones Estratégicas*)
- Dirección del festival Rockfest de Hard Rock Café (Cap. 3 de *Decisiones Estratégicas*)
- Previsión en Hard Rock Café (Cap. 4 de *Decisiones Estratégicas*)
- Regal Marine: diseño del producto (Cap. 5 de *Decisiones Estratégicas*)
- Diseño del producto y asociación con proveedores en Motorola (Cap. 5 de *Decisiones Estratégicas*)
- La cultura de la calidad en el hospital Arnold Palmer (Cap. 6 de *Decisiones Estratégicas*)
- Ritz Carlton: Calidad (Cap. 6 de *Decisiones Estratégicas*)
- Competitividad y mejora continua en Xerox (Cap. 6 de *Decisiones Estratégicas*)
- Diseño y calidad de los servicios en Marriott (Cap. 6 de *Decisiones Estratégicas*)
- Control estadístico de los procesos en Kart Manufacturing (Suplemento 6 de *Decisiones Estratégicas*).
- Wheeled Coach: Estrategia de procesos (Cap. 7 de *Decisiones Estratégicas*)
- Análisis de los procesos en el Hospital Arnold Palmer (Cap. 7 de *Decisiones Estratégicas*)
- Estrategia y elección de procesos (Cap. 7 de *Decisiones Estratégicas*)
- Tecnología y manufacturas: sistemas de producción flexibles (Cap. 7 de *Decisiones Estratégicas*)
- Planificación de la capacidad en el Hospital Arnold Palmer (Cap. 7 de *Decisiones Estratégicas*)
- Dónde abrir el próximo restaurante de Hard Rock Café (Cap. 8 de *Decisiones Estratégicas*)
- Wheeled Coach: disposición de las instalaciones (Cap. 9 de *Decisiones Estratégicas*)
- Disposición de las nuevas instalaciones del Hospital Arnold Palmer (Cap. 9 de *Decisiones Estratégicas*)
- Estrategia de recursos humanos de Hard Rock Café (Cap. 10 de *Decisiones Estratégicas*)
- Equipos y participación de los empleados en Hewlett-Packard (Cap. 10 de *Decisiones Estratégicas*)

- Regal Marine: Gestión de la cadena de suministros (Cap. 1 de *Decisiones Tácticas*)
- La cadena de suministros del Hospital Arnold Palmer (Cap. 1 de *Decisiones Tácticas*)
- Comercio electrónico y las sandalias deportivas Teva (Supl. 1 de *Decisiones Tácticas*)
- Wheeled Coach: control de inventarios (Cap. 2 de *Decisiones Tácticas*)
- Wheeled Coach: planificación de las necesidades de materiales (Cap. 4 de *Decisiones Tácticas*)
- Programación en Hard Rock Café (Cap. 5 de *Decisiones Tácticas*)
- Sistema justo a tiempo en el hospital Arnold Palmer (Cap. 6 de *Decisiones Tácticas*)

SITIO WEB ACOMPAÑANTE

Visite nuestro sitio web acompañante en **www.prenhall.com/heizer** para encontrar recursos específicos para este manual, tanto para los alumnos como para los profesores. Algunos de los recursos que podrá encontrar son:

Para los alumnos:

Preguntas de autoevaluación Estas numerosas preguntas incluyen una amplia variedad de cuestiones, con 20 a 25 preguntas por capítulo, que comprenden preguntas tipo test, verdadero o falso y preguntas para desarrollar. Las preguntas de autoevaluación pueden ser calificadas y transmitidas al profesor para recibir créditos adicionales, o servir de práctica para los exámenes.

Giras virtuales Estas giras por empresas ofrecen vínculos directos a empresas que incluyen desde un hospital hasta un fabricante de automóviles, para poner en práctica conceptos clave. Tras la gira por cada sitio web se pide a los alumnos que respondan a preguntas relacionadas directamente con los conceptos analizados en el capítulo.

Problemas en Internet En el sitio web hay una serie de problemas para resolver que ofrecen material de trabajo adicional para los alumnos.

Casos de estudio en Internet Asigne material adicional de casos de estudio gratuitos desde este sitio web.

Para los docentes:

Se pueden descargar materiales de apoyo a la docencia del catálogo online de Prentice Hall en **www.prenhall.com**. Esta zona protegida con contraseña ofrece a los docentes los materiales de apoyo más actualizados y avanzados disponibles: manual de soluciones para el profesor, manual de recursos para el profesor, diapositivas en PowerPoint, diapositivas del sistema de respuesta personal, y preguntas de examen.

RECONOCIMIENTOS

Queremos dar las gracias a las numerosas personas que han tenido la amabilidad de ayudarnos en esta empresa. Los siguientes catedráticos nos han dado sus opiniones que nos han guiado en la revisión:

Shahid Ali
Rockhurst University

Stephen Allen
Truman State University

William Barnes
Emporia State University

Leon Bazil
Stevens Institute of Technology

Victor Berardi
Kent State University

Mark Berenson
Montclair State University

Joe Biggs
California Polytechnic State University

Peter Billington
Colorado State University-Pueblo

Lesley Buehler
Ohlone College

Darlene Burk
Western Michigan University

David Cadden
Quinnipiac College

James Campbell
University of Missouri-St. Louis

William Christensen
Dixie State College of Utah

Roy Clinton
University of Louisiana at Monroe

Hugh Daniel
Lipscomb University

Anne Deidrich
Warner Pacific College

John Drabouski
DeVry University

Richard E. Dulski
Daemen College

Charles Englehardt
Salem International University

Wade Ferguson
Western Kentucky University

Rita Gibson
Embry-Riddle Aeronautical University

Eugene Hahn
Salisbury University

John Hoft
Columbus State University

Garland Hunnicutt
Texas State University

Wooseung Jang
University of Missouri-Columbia

Dana Johnson
Michigan Technological University

William Kime
University of New Mexico

Beate Klingenberg
Marist College

Jean Pierre Kuilboer
University of Massachusetts-Boston

Gregg Lattier
Lee College

Ronald Lau
Hong Kong University of Science and Technology

Mary Marrs
University of Missouri-Columbia

Richard Martin
California State University-Long Beach

Gordon Miller
Portland State University

John Miller
Mercer University

Donna Mosier
SUNY Potsdam

Arunachalam Narayanan
Texas A&M University

Susan Norman
Northern Arizona University

Prafulla Oglekar
LaSalle University

David Pentico
Duquesne University

Elizabeth Perry
SUNY Binghamton

Frank Pianki
Anderson University

Michael Plumb
Tidewater Community College

Leonard Presby
William Paterson University

Zinovy Radovilsky
California State University, Hayward

William Reisel
St. John's University

Spyros Reveliotis
Georgia Institute of Technology

Scott Roberts
Northern Arizona University

Stanford Rosenberg
LaRoche College

Edward Rosenthal
Temple University

Peter Rourke
Wentworth Institute of Technology

X. M. Safford
Milwaukee Area Technical College

Robert Schlesinger
San Diego State University

Daniel Shimshak
University of Massachusetts-Boston

Theresa A. Shotwell
Florida A&M University

Ernest Silver
Curry College

Samuel Y. Smith Jr.
University of Baltimore

Victor Sower
Sam Houston State University

John Stec
Oregon Institute of Technology

A. Lawrence Summers
University of Missouri

Rajendra Tibrewala
New York Institute of Technology

Ray Walters
Fayetteville Technical Community College

Jianghua Wu
Purdue University

Lifang Wu
University of Iowa

Xin Zhai
Purdue University

También queremos agradecer la ayuda de los revisores de las ediciones anteriores de este manual. Sin la ayuda de estos compañeros docentes, nunca hubiéramos recibido la información necesaria para crear un manual útil. Los revisores aparecen en orden alfabético.

Sema Alptekin
University of Missouri-Rolla

Suad Alwan
Chicago State University

Jean-Pierre Amor
University of San Diego

Moshen Attaran
California State University-Bakersfield

Ali Behnezhad
California State University-Northridge

John H. Blackstone
University of Georgia

Theodore Boreki
Hofstra University

Rick Carlson
Metropolitan State University

Wen-Chyuan Chiang
University of Tulsa

Mark Coffin
Eastern California University

Henry Crouch
Pittsburgh State University

Warren W. Fisher
Stephen F. Austin State University

Larry A. Flick
Norwalk Community Technical College

Barbara Flynn
Wake Forest University

Damodar Golhar
Western Michigan University

Jim Goodwin
University of Richmond

James R. Gross
University of Wisconsin-Oshkosh

Donald Hammond
University of South Florida

John Harpell
West Virginia University

Marilyn K. Hart
University of Wisconsin-Oshkosh

James S. Hawkes
University of Charleston

George Heinrich
Wichita State University

Sue Helms
Wichita State University

Johnny Ho
Columbus State University

Zialu Hug
University of Nebraska-Omaha

Peter Ittig
University of Massachusetts

Paul Jordan
University of Alaska

Larry LaForge
Clemson University

Hugh Leach
Washburn University

B. P. Lingeraj
Indiana University

Andy Litteral
University of Richmond

Laurie E. Macdonald
Bryant College

Henry S. Maddux III
Sam Houston State University

Mike Maggard
Northeastern University

Mark McKay
University of Washington

Arthur C. Meiners, Jr.
Marymount University

Zafar Malik
Governors State University

Doug Moodie
Michigan Tech University

Philip F. Musa
University of Alabama at Birmingham

Joao Neves
Trenton State College

John Nicolay
University of Minnesota

Susan K. Norman
Northern Arizona University

Niranjan Pati
University of Wisconsin-LaCrosse

Michael Pesch
St. Cloud State University

David W. Pentico
Duquesne University

Leonard Presby
William Patterson State College-NJ

Zinovy Radovilsky
California State University-Hayward

Ranga V. Ramasesh
Texas Christian University

Emma Jane Riddle
Winthrop University

M. J. Riley
Kansas State University

Narendrea K. Rustagi
Howard University

Teresita S. Salinas
Washburn University

Chris Sandvig
Western Washington University

Ronald K. Satterfield
University of South Florida

Robert J. Schlesinger
San Diego State University

Shane J. Schvaneveldt
Weber State University

Avanti P. Sethi
Wichita State University

Girish Shambu
Canisius College

L.Wayne Shell (retired)
Nicholls State University

Susan Sherer
Lehigh University

Vicki L. Smith-Daniels
Arizona State University

Vic Sower
Sam Houston State University

Stan Stockton
Indiana University

John Swearingen
Bryant College

Susan Sweeney
Providence College

Kambiz Tabibzadeh
Eastern Kentucky University

Rao J. Taikonda
University of Wisconsin-Oshkosh

Cecelia Temponi
Texas State University

Madeline Thimmes
Utah State University

Doug Turner
Auburn University

V. Udayabhanu
San Francisco State University

John Visich-Disc
University of Houston

Rick Wing
San Francisco State University

Bruce M. Woodworth
University of Texas-El Paso

Además, queremos dar las gracias a la excelente plantilla de Prentice Hall, que nos ha dado tanto ayuda como asesoría: Mark Pfaltzgraff, nuestro editor ejecutivo de ciencias de las decisiones; Debbie Clare, nuestra directora ejecutiva de marketing; Jane Avery, nuestra ayudante editorial ejecutiva; Nancy Welcher, nuestra directora de desarrollo de proyectos mediáticos; Cynthia Regan, nuestra editora ejecutiva, y Karen Misler, nuestra editora de suplementos. Reva Shader desarrolló los sobresalientes índices analíticos del manual. Donna Render y Kay Heizer proporcionaron un preciso mecanografiado y corrección ortotipográfica, tan críticas en un manual riguroso. Nos sentimos realmente privilegiados por disponer de un equipo tan maravilloso de expertos para dirigirnos, guiarnos y ayudarnos.

También agradecemos los esfuerzos de los colegas que nos han ayudado a dar forma a todo el paquete de materiales de estudio que acompaña a este manual. El catedrático L. Wayne Shell nos ayudó a crear nuestro nuevo conjunto de problemas y editó/revisó el anterior; el catedrático Howard Weiss (Temple University) desarrolló los programas informáticos Active Model, Excel OM y POM para Windows; el catedrático Jeff Heyl (Universidad Lincoln) creó las diapositivas en PowerPoint y también redactó el manual de recursos para el profesor; el doctor Vijay Gupta desarrolló los discos de datos de Excel OM y POM para Windows; el catedrático L. Wayne Shell preparó el banco de exámenes; Beverly Amer (Universidad de Northern Arizona) produjo y dirigió nuestra serie de casos de estudio en vídeo en el CD-ROM; los catedráticos Keith Willoughby (Universidad Bucknell) y Ken Klassen (Universidad Brock) contribuyeron a los dos juegos de simulación con Excel; el catedrático Gary LaPoint (Universidad de Siracusa) desarrolló el ejercicio de reducción de plazos con MS Project y el juego de dados del control estadístico de procesos; y el catedrático Bill Swart (Universidad de East Carolina) creó las actividades en Powerpoint del sistema de respuesta personal. Nos sentimos afortunados por haber podido trabajar con todos ellos.

Les deseamos una agradable y productiva presentación a la dirección de operaciones.

BARRY RENDER
GRADUATE SCHOOL OF BUSINESS
ROLLINS COLLEGE
WINTER PARK, FL 32789
EMAIL: BARRY.RENDER@ROLLINS.EDU

JAY HEIZER
TEXAS LUTHERAN UNIVERSITY
1000 W. COURT STREET
SEGUIN, TX 78155
EMAIL: JHEIZER@TLU.EDU

Parte I Dirección de las operaciones

DIRECCIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTROS

1

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando acabe este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Dirección de la cadena de suministros
- Aprovisionamiento
- Externalización (Outsourcing)
- Compra electrónica (E-procurement)
- Gestión de materiales
- *Keiretsu*
- Empresas virtuales

Describir o explicar:

- Estrategias de cadena de suministros
- Enfoque de las negociaciones

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

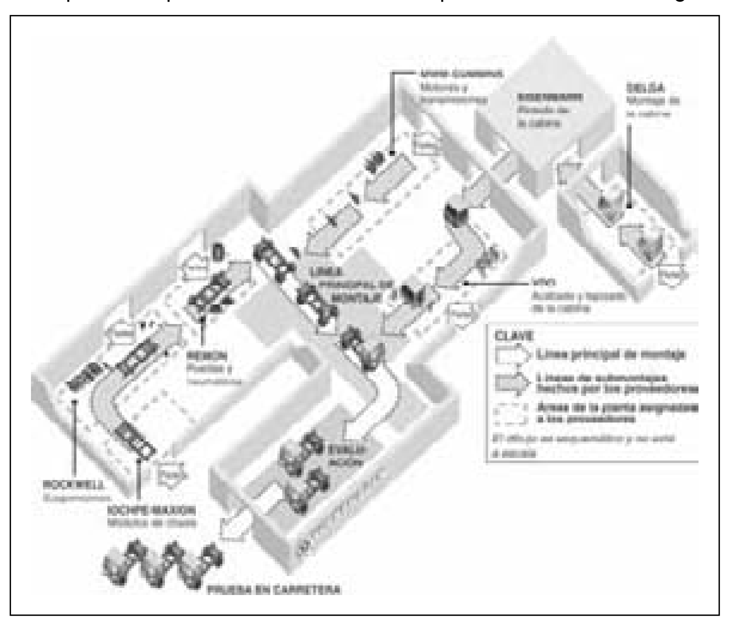
PERFIL DE UNA EMPRESA GLOBAL: VOLKSWAGEN

El experimento radical de Volkswagen en la dirección de la cadena de suministros

En su nueva fábrica brasileña a 160 kilómetros de Rio de Janeiro, Volkswagen está cambiando radicalmente su cadena de suministros. Con esta fábrica experimental de camiones, Volkswagen está segura de que ha encontrado un sistema que reducirá el número de componentes defectuosos, que disminuirá los costes de la mano de obra y que mejorará la eficiencia. Como el mercado potencial de VW es pequeño, ésta es una fábrica relativamente pequeña. La producción programada es únicamente de 100 camiones al día con tan sólo 1.000 trabajadores. Sin embargo, sólo 200 de los 1.000 trabajadores son empleados de Volkswagen. Los empleados de VW son responsables de la totalidad de la calidad, marketing, investigación y diseño. Los 800 trabajadores restantes, que trabajan para proveedores como Rockwell International, Cummins Engines, Delga Automotiva, Remon y VDO, realizan las tareas de ensamblaje. Se espera que la innovadora cadena de suministros de Volkswagen mejore la calidad y disminuya los costes, en tanto que cada subcontratista se responsabiliza de sus unidades y de la remuneración de sus trabajadores. Con esta estrategia, los subcontratistas de Volkswagen aceptan un mayor número de costes directos y riesgos.

Como muestra el esquema, en la primera parada del proceso de montaje los trabajadores de Iochpe-Maxion montan el depósito de gasolina, los conductos de transmisión y los bloques de dirección. Cuando el bastidor continúa por la cadena, los empleados de Rockwell montan ejes y frenos. A continuación, los trabajadores de Remon colocan las ruedas y ajustan la presión de los neumáticos. El equipo de MWM/Cummins instala el motor y la transmisión. Las cabinas de los camiones son producidas por la empresa brasileña Delga, pintadas por Eisenmann, y acabadas y tapizadas por VDO, siendo ambas empresas alemanas. Los empleados de Volkswagen llevan a cabo la evaluación del camión terminado.

Como la tecnología y la eficiencia económica requieren especialización, muchas empresas, como Volkswagen, se centran cada vez más en la contratación externa (o externalización/outsourcing) y en la integración de la cadena de suministros. Sin embargo, en esta fábrica, Volkswagen no sólo compra los materiales, sino que también compra la mano de obra y los servicios relacionados con ella. Los proveedores están fuertemente integrados en la propia red de VW, hasta el trabajo de montaje en la planta de ensamblaje.



Los principales proveedores de Volkswagen tienen un lugar asignado en la planta de VW, y se autosuministran sus propios componentes, proveedores y trabajadores. Los empleados de diversos proveedores construyen el camión a medida que avanza por la línea de montaje. El personal de Volkswagen realiza la inspección.

Puesto que el coste de compra en la industria del automóvil supera el 60 por ciento de las ventas en dólares, incluso pequeñas reducciones en estos costes podrían proporcionar un importante beneficio a Vokswagen. Los resultados aún no se han alcanzado, pero VW está ya intentando un planteamiento análogo en las fábricas de Buenos Aires, Argentina, y Skoda en la República Checa. El nuevo nivel de integración en la gestión de la cadena de suministros de Volkswagen puede ser la tendencia del futuro.

La mayoría de las empresas, al igual que Volkswagen, gastan más del 50 por ciento del importe de sus ventas en compras. Dado que tan alto porcentaje de los costes de una empresa están determinados por las compras, las relaciones con los proveedores se están haciendo cada vez más integradas y a largo plazo. Los esfuerzos conjuntos, empresa-proveedor, que mejoran innovación, velocidad de diseño y reducción de costes, son cada vez más frecuentes. Estos esfuerzos, cuando forman parte de una estrategia integrada, pueden mejorar de manera espectacular la competitividad de ambos socios. Este cambio de enfoque pone un mayor énfasis en el aprovisionamiento y en las relaciones con los proveedores, las cuales deben ser gestionadas. La disciplina que gestiona estas relaciones es conocida como *dirección o gestión de la cadena de suministros.*

DIEZ DECISIONES ESTRATÉGICAS DE DIRECCIÓN DE OPERACIONES

- Diseño de bienes y servicios
- Gestión de la calidad
- Estrategia de proceso
- Estrategias de localización
- Estrategias de layout
- Recursos humanos
- **Dirección de la cadena de suministros**
- Gestión del inventario
- Programación
- Mantenimiento

IMPORTANCIA ESTRATÉGICA DE LA CADENA DE SUMINISTROS

La **dirección de la cadena de suministros** es la integración de las actividades que aprovisionan materiales y servicios, los transforman en bienes intermedios y productos finales, y los distribuyen a los clientes. Estas actividades incluyen las actividades de compra y outsourcing, más muchas otras funciones que son importantes para la relación con proveedores y distribuidores. Como muestra la Figura 1.1, la dirección de la cadena de suministros supone determinar: (1) proveedores de transporte, (2) créditos y transferencias de efectivo, (3) proveedores, (4) distribuidores y bancos, (5) cuentas a pagar y cobrar, (6) almacenaje y niveles de inventario, (7) cumplimiento de pedidos, y (8) compartir información de clientes, previsiones y producción. El objetivo es construir una cadena de proveedores que se centre en maximizar el valor para el cliente final. La competencia ya no tiene lugar entre empresas, sino entre cadenas de suministros. Y esas cadenas de suministros suelen ser globales.

Dirección de la cadena de suministros
Gestión de las actividades que proporcionan materiales y servicios, las transforman en bienes intermedios y productos finales, y entregan los productos a los clientes a través de un sistema de distribución.

A medida que las empresas se esfuerzan en aumentar su competitividad mediante la personalización del producto, alto nivel de calidad, reducciones de coste y rapidez de respuesta al mercado, cada vez otorgan una mayor importancia a la cadena de suministros. La clave para conseguir una dirección de la cadena de suministros eficaz es hacer que los proveedores sean "socios" en la estrategia de la empresa para satisfacer un mercado en continuo cambio. Una ventaja competitiva puede depender de una estrecha relación estratégica a largo plazo con unos pocos proveedores.

Para asegurar que la cadena de suministros respalda a la estrategia de la empresa, los directivos necesitan considerar los aspectos de la cadena de suministros mostrados en la Tabla 1.1. Las actividades de los directores de cadenas de suministros incluyen aspectos de las disciplinas de contabilidad, finanzas, marketing y operaciones. De la misma manera que la función de dirección de operaciones respalda la estrategia global de la empresa, la cadena de suministros debe respaldar la estrategia de la dirección de operaciones. Las estrategias de bajos costes o de respuesta rápida al mercado exigen cosas diferentes de la cadena de suministros de lo que exigiría una estrategia de diferenciación. Por ejemplo, una estrategia de bajos costes, como muestra la Tabla 1.1, requiere una selección de proveedores basada, fundamentalmente, en el coste. Dichos proveedores tienen que poseer la habilidad de diseñar productos de bajo coste que cumplan con los requisitos funcionales de

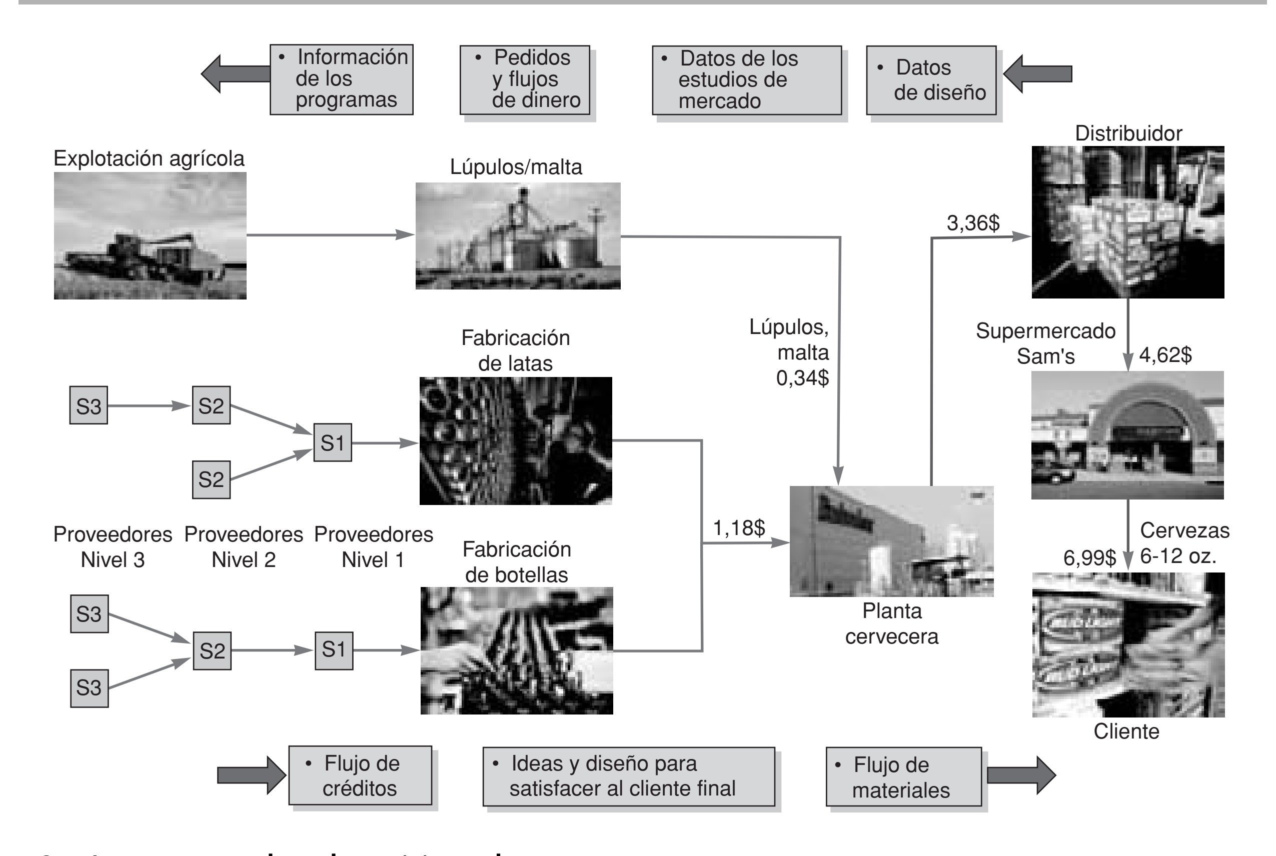


FIGURA 1.1 ■ Una cadena de suministros de una empresa cervecera

La cadena de suministros incluye todas las relaciones entre proveedores, productores, distribuidores y clientes. La cadena incluye el transporte, la información sobre programación, las transferencias de efectivo y créditos, así como transferencias de ideas, diseños y materiales. Incluso los fabricantes de latas y botellas tienen sus propios niveles de proveedores que les proporcionan componentes como vidrio, chapas, etiquetas, contenedores, etcétera. (Los costes son aproximados e incluyen los impuestos importantes).

minimizar el inventario y de disminuir los plazos de entrega. La empresa debe lograr la integración de su estrategia elegida de arriba abajo en la cadena de suministros, y debe esperar que la estrategia sea diferente para los distintos productos, y que cambie a medida que los productos avanzan en su ciclo de vida.

Aspectos de la cadena de suministros global

El objetivo de la gestión de una cadena de suministros global es crear una cadena de proveedores centrados en maximizar el valor para el cliente final.

Cuando las empresas entran en mercados globales crecientes, como los de Europa del Este, China, Sudamérica, e incluso México, la ampliación de sus cadenas de suministros se convierte en un reto estratégico. La calidad de la producción en estas áreas puede ser un reto; así mismo los sistemas de distribución pueden ser menos fiables, lo que sugiere que los niveles de inventario sean más elevados de lo que deberían ser en el país de origen de la compañía. Los aranceles y las cuotas también pueden impedir que las empresas que no son locales hagan negocios. Además, en muchas partes del mundo sigue habiendo un importante riesgo, tanto cambiario como político[1].

[1] Remarquemos la devaluación del peso mexicano en 1992, del baht tailandés y del ringgit malasio en 1997, y del peso argentino en 2002, así como los conflictos armados en unas dos docenas de países en cualquier momento. Incluso el estable dólar estadounidense alcanzó mínimos históricos respecto al euro en 2005.

TABLA 1.1 ■ Cómo las decisiones de cadena de suministros afectan a la estrategia

	Estrategia de coste bajo	Estrategia de respuesta rápida	Estrategia de diferenciación:
Objetivo de los proveedores	Suministrar la demanda al menor coste posible (ejemplo, Emerson Electric, Taco Bell)	Responder rápidamente a los cambios de requerimientos y de demanda para minimizar la falta de existencias (ejemplo, Dell Computers)	Compartir la investigación de mercado; desarrollo conjunto de opciones y productos (ejemplo, Benetton)
Criterios de selección principales	Seleccionar principalmente en función del coste	Seleccionar principalmente por capacidad, velocidad y flexibilidad	Seleccionar principalmente por las habilidades en el desarrollo de producto
Características del proceso	Mantener una utilización media elevada	Invertir en exceso de capacidad y en procesos flexibles	Procesos modulares que permitan una personificación en masa
Características del inventario	Minimizar el inventario en toda la cadena para mantener bajos los costes	Desarrollar sistemas de respuesta rápida, con inventarios de reserva para asegurar el suministro	Minimizar el inventario en la cadena para evitar la obsolescencia
Características de los plazos	Acortar plazos siempre que no se incrementen los costes	Invertir de forma agresiva para reducir el plazo de producción	Invertir de forma agresiva para reducir el plazo de desarrollo
Características del diseño del producto	Maximizar el rendimiento y minimizar los costes	Utilizar diseños de producto que permitan bajos tiempos de preparación de máquinas e incrementos rápidos de producción	Utilizar el diseño por módulos para posponer la diferenciación del producto el mayor tiempo posible

Véase la tabla y el análisis correspondientes en Marshall L. Fisher, “What is the Right Supply Chain for Your Product?” *Harvard Business Review* (marzo-abril 1997): 105.

Por tanto, el desarrollo de un plan estratégico de éxito para la gestión de la cadena de suministros requiere una planificación innovadora y una cuidadosa investigación. Las cadenas de suministros en un entorno global deben ser capaces de:

1. Reaccionar frente a los cambios imprevistos en la disponibilidad de piezas, en los canales de distribución o de transporte, en los impuestos de aduanas y en los cambios monetarios.
2. Utilizar las últimas tecnologías informáticas y de transmisión, para planificar y gestionar la llegada de componentes a las factorías y el envío de productos acabados a los clientes.
3. Emplear a especialistas locales que se encarguen de los impuestos, del transporte, de las aduanas y de las cuestiones políticas.

McDonald’s planificó el desafío de una cadena de suministros global seis años antes de su apertura en Rusia. Al crear una “ciudad de comida” de 60 millones de dólares, desarrolló sus propias plantas de suministro en Moscú, para mantener sus costes de transpor-

te y plazos de entrega bajos, y sus niveles de calidad y de servicio al cliente elevados. Cada componente de esta cadena de alimentación –planta de carne, planta de pollo, panadería, planta de pescado, y planta de lechuga– está rigurosamente controlada para asegurar que todos los eslabones del sistema son fuertes.

Empresas como Ford y Boeing también afrontan decisiones de aprovisionamiento globales. El modelo Mercury de Ford tiene sólo 227 proveedores en todo el mundo, un número relativamente reducido si lo comparamos con los 700 involucrados en modelos anteriores. Ford ha marcado una pauta de desarrollar una red global de *pocos* proveedores que proporcionen el menor coste y la calidad más elevada independientemente del país de origen. Tan global es la producción del Boeing 787, que entre el 75 y el 80 por ciento del avión será construido por empresas distintas a Boeing, y la mayoría de fuera de Estados Unidos. El recuadro sobre *Dirección de producción en Acción* "Una rosa es una rosa, pero sólo si no está marchita" detalla una cadena de suministros global que termina en la floristería de su barrio.

TABLA 1.2 ■ Costes de la cadena de suministros como porcentaje de las ventas

Industria	% comprado
Todas las industrias	52
Automóvil	67
Alimentación	60
Madera	61
Papel	55
Petróleo	79
Transporte	62

ECONOMÍA DE LA CADENA DE SUMINISTROS

Se otorga tanta importancia a la cadena de suministros porque es una parte integral de la estrategia de una empresa y la actividad más cara en la mayoría de las empresas. Tanto para bienes como para servicios, los costes de la cadena de suministros, como porcentaje de las ventas, suelen ser importantes (*véase* la Tabla 1.2). Dado que una elevada parte de los ingresos está destinada a la cadena de suministros, es vital poseer una estrategia eficaz. La

DIRECCIÓN DE MARKETING EN ACCIÓN

UNA ROSA ES UNA ROSA, PERO SÓLO SI NO ESTÁ MARCHITA

¿Hasta qué punto pueden ser rápidas las cadenas de suministros? ¿Hasta qué grado pueden ser buenas las cadenas de suministros? Las cadenas de suministros de alimentos y flores deben ser rápidas y buenas. Cuando la cadena de suministros de alimentos tiene un problema, lo mejor que puede ocurrir es que el consumidor no coma a su hora; lo peor es que el consumidor coma comida en mal estado, se envenene y muera. En la industria de las flores, el tiempo y la temperatura también son factores fundamentales. En efecto, las flores son el producto agrícola más perecedero, incluso más que el pescado. Las flores no sólo tienen que moverse rápido, sino que también deben mantenerse frescas, a una temperatura constante de entre 33 y 36 °F. Y debe suministrárseles agua tratada con conservantes durante el transporte. Las rosas son especialmente delicadas, frágiles y perecederas.

El 70 por ciento de las rosas que se venden en el mercado estadounidense llegan por avión de las zonas rurales de Colombia y Ecuador. Las rosas se mueven por esta cadena de suministros a través de una intrincada pero rápida red de transporte. La red se extiende desde los cultivadores ecuatorianos que cortan, clasifican, agrupan, envuelven y envían, a los importadores que hacen el trato, al personal del Departamento de Agricultura estadounidense que pone en cuarentena e inspecciona buscando insectos, enfermedades y parásitos, a los agentes de aduanas estadounidenses que inspeccionan y autorizan, a los agentes de aduanas que despachan en las aduanas y etiquetan, a los mayoristas que distribuyen, a las floristerías que las arreglan y venden, y finalmente al cliente. Cada minuto que pasa se está deteriorando el producto. Pero, cuando las rosas se encuentran ante el ojo escrutador del último receptor, cada delicado pétalo es crítico. La sensibilidad al tiempo y a la temperatura de productos perecederos como las rosas requiere sofisticación y reglas perfectas en la cadena de suministros. El resultado es calidad y pocas pérdidas. Al fin y al cabo, cuando es el día de San Valentín, ¿de qué sirve un cargamento de rosas marchitas o que llegan tarde? Es una difícil cadena de suministros; sólo una cadena excelente conseguirá el objetivo.

Fuentes: USA Today (9 de febrero de 2005): 6B; *Supply Management* (13 de febrero de 2003): 20-23; y *IIE Solutions* (febrero de 2002): 26-32.

TABLA 1.3 ■ Dólares de ventas adicionales necesarias para igualar un dólar ahorrado en la cadena de suministros[a]

Porcentaje de beneficio neto de la empresa	Porcentaje de ventas gastado en la cadena de suministros						
	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
2	2,78$	3,23$	3,85$	4,76$	6,25$	9,09$	16,67$
4	2,70$	3,13$	3,70$	4,55$	5,88$	8,33$	14,29$
6	2,63$	3,03$	3,57$	4,35$	5,56$	7,69$	12,50$
8	2,56$	2,94$	3,45$	4,17$	5,26$	7,14$	11,11$
10	2,50$	2,86$	3,33$	4,00$	5,00$	6,67$	10,00$

[a] El aumento necesario de ventas supone que el 50 por ciento de los costes que no son compras son variables, y que la mitad de los restantes (menos beneficios) son fijos. Por lo tanto, en unas ventas de 100 dólares (50% compras y 2% margen de beneficios), 50 dólares son compras, 24 dólares son otros costes variables, 24 dólares son costes fijos, y el beneficio es de 2 dólares. Un aumento de ventas de 3,85 dólares ofrece el siguiente resultado:

Compras al 50%	51,93$
Otros costes variables	24,92$
Costes fijos	24,00$
Beneficio	3,00$
	103.85$

Por 3,85 dólares de ventas adicionales, el beneficio aumenta en 1 dólar: de 2 dólares a 3 dólares. Se podría obtener el mismo margen de aumento reduciendo los costes de provisiones en 1 dólar.

cadena de suministros ofrece a las empresas una gran oportunidad de reducción de costes y aumento de los márgenes de contribución.

La Tabla 1.3 muestra el apalancamiento del que dispone un director de operaciones con la cadena de suministros. Las empresas que, por ejemplo, gastan el 50 por ciento del importe de sus ventas en dólares en la cadena de suministros, y tienen un beneficio neto del 6 por ciento, necesitarían 3,57 dólares de ventas para igualar los ahorros derivados del ahorro de 1 dólar en compras. Estas cifras muestran el importante papel que el aprovisionamiento desempeña en la rentabilidad.

Por 3,85 dólares de ventas adicionales, el beneficio aumenta en 1 dólar, de 2 a 3 dólares. Se podría obtener el mismo aumento de margen reduciendo los costes de cadena de suministros en 1 dólar.

Decisiones de producción o compra

Un comerciante, mayorista o minorista, compra todo lo que vende; un fabricante casi nunca lo hace. Fabricantes, restaurantes y ensambladores de productos compran componentes

EJEMPLO 1

Potencial de beneficios en la cadena de suministros

La empresa Goodwin gasta el 50 por ciento del importe de sus ventas en dólares en cadena de suministros. La empresa obtiene un beneficio neto del 4 por ciento. Del 46 por ciento restante, un 23 por ciento es fijo y el otro 23 por ciento es variable. En la Tabla 1.3 podemos observar que el valor de las ventas, en dólares, necesario para generar el mismo beneficio que el que se obtendría como resultado del ahorro de 1 dólar en cadena de suministros, sería de 3,70 dólares.

TABLA 1.4 ■ Consideraciones para tomar la decisión de producir o comprar

Razones para producir	Razones para comprar
1. Conservar competencias claves de la empresa	**1.** Libera a los directivos para que se centren en su negocio principal
2. Coste de producción inferior al de compra	**2.** Coste de adquisición menor que el de fabricación
3. Proveedores no apropiados	**3.** Mantener los compromisos con el proveedor
4. Asegurar un suministro adecuado (cantidad o entrega)	**4.** Obtener capacidad técnica o de gestión
5. Utilizar mano de obra o instalaciones excedentes y conseguir una contribución marginal.	**5.** Capacidad de fabricación inadecuada
6. Obtener la calidad deseada	**6.** Reducir costes de inventario
7. Eliminar colusión con proveedores	**7.** Asegurar fuentes alternativas del producto
8. Obtener un producto especial que supondría una dedicación prohibitiva para un proveedor	**8.** Recursos técnicos o de gestión inadecuados
9. Evitar el despido de personal	**9.** Reciprocidad
10. Proteger un diseño patentado o salvaguardar la calidad propia	**10.** El producto está protegido por patente o secreto comercial
11. Aumentar o mantener el tamaño de la empresa (preferencia de la dirección)	

Decisión de producir o comprar
Elección entre producir un componente o servicio dentro de la empresa, o comprarlo a una fuente externa.

y subconjuntos que transforman en productos finales. Como vimos en el Capítulo 5 del volumen *Decisiones Estratégicas*, la elección de productos y servicios que se pueden obtener ventajosamente en *el exterior*, en lugar de producirse *internamente*, se conoce como **decisión de producir o comprar**. El personal de la cadena de suministros evalúa a diferentes proveedores y proporciona datos completos, exactos y actuales en relación con la alternativa de comprar. La Tabla 1.4 muestra una relación de los factores a tener en cuenta en la decisión de compra o de fabricación. Independientemente de la decisión que se tome, el rendimiento de la cadena de suministros debe revisarse periódicamente. La competencia y los costes de los proveedores cambian, al igual que la estrategia de la propia empresa, sus capacidades de producción y sus costes.

EXTERNALIZACIÓN (OUTSOURCING)

Externalización (Outsourcing)
Transferencia de las actividades de una empresa, que tradicionalmente se han hecho internamente, a proveedores externos.

La **externalización** (también denominada contratación externa o subcontratación, o en su muy aceptado término en inglés, *outsourcing*) transfiere algunas de las que son actividades y recursos internos tradicionales de una empresa a proveedores externos, haciéndolo de manera ligeramente diferente a la tradicional decisión de fabricar o comprar. La externalización es parte de la continua tendencia hacia la utilización de la eficiencia que proviene de la especialización. Esto permite que la empresa que ha recurrido a la externalización se pueda centrar en sus factores de éxito críticos, es decir, en sus competencias claves que le proporcionan una ventaja competitiva.

Con la externalización, no es necesario que haya un producto tangible o que se transfiera una titularidad. La empresa contratante puede, incluso, proporcionar los recursos necesarios para realizar las actividades. Los recursos transferidos a la empresa proveedora pueden incluir instalaciones, personal y equipos. Muchas empresas externalizan sus necesidades

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

EXTERNALIZACIÓN, PERO NO A LA INDIA, SINO A LUGARES REMOTOS DE ESTADOS UNIDOS

Las empresas estadounidenses continúan su búsqueda global para aumentar su eficiencia externalizando los centros de atención telefónica y las actividades administrativas, pero muchas consideran que no tienen que buscar mucho más lejos de un lugar llamado Nacogdoches, Texas.

Para las empresas estadounidenses que se enfrentan a problemas de calidad con sus actividades externalizadas en la India, y a mala publicidad en casa, las pequeñas ciudades estadounidenses se convierten en una atractiva alternativa. Nacagdoches (con una población de 29.914 habitantes), o Twin Falls, Idaho (34.469), pueden ser lugares perfectos para centros de atención telefónica. Aunque el salario sólo asciende a siete dólares por hora, el trabajo es uno de los mejores que puede conseguir un ciudadano de estos lugares.

Yéndose desde las grandes ciudades a los costes más baratos inmobiliarios y de mano de obra de las pequeñas ciudades, las empresas pueden ahorrarse millones y, aun así, aumentar la productividad. Un centro de atención telefónica situado en una pequeña ciudad que acaba de perder su mayor planta de fabricación puede contratar fácilmente trabajadores. U.S. Bank acaba de elegir Coeur d'Arlente, Idaho, para ubicar su centro de atención telefónica de tarjetas de crédito. La ciudad "tiene un problema muy serio de desempleo –comenta el vicepresidente Scott Hansen–. Podemos llegar con 500 puestos de trabajo y realmente influir en la comunidad".

Dell acaba de inaugurar su centro corporativo de atención telefónica a clientes en Twin Falls, tras cerrar un centro análogo en la India como consecuencia de las quejas de los consumidores. De la misma manera, Lehman Brothers acaba de cancelar su contrato de externalización en la India. Pero el aprovechamiento de salarios sumamente bajos no va a desaparecer de inmediato. IBM ha comprado Daksh eServices Ltd., una empresa india de centros de atención telefónica con 9.000 empleados, por 170 millones de dólares.

Fuentes: The Wall Street Journal (9 de junio de 2004): B1, B8; y (14 de junio de 2001): A1; *Risk Management* (julio de 2004): 24-29; y *Business Week* (26 de abril de 2004): 56.

de tecnología de la información, los trabajos de contabilidad, las funciones de asesoría legal, la logística e, incluso, el ensamblaje de los productos. Dado el bajo coste de la transferencia electrónica de datos por todo el mundo, las actividades que pueden transferirse electrónicamente son las primeras candidatas a la externalización. Encontramos "centros de atención telefónica (*call centers*)" para los franceses en Angola (una antigua colonia francesa en África) y para Estados Unidos e Inglaterra en la India. Vemos cómo las preguntas enviadas por los clientes a Microsoft por correo electrónico, y los servicios de contabilidad, finanzas y gestión de Procter & Gamble, se encaminan hacia las Filipinas. Dentro de Estados Unidos, la compañía Electronic Data Systems (EDS) proporciona outsourcing de tecnología de la información para muchas empresas, entre otras a Delphi Automotive y Nextel. De forma parecida, Automatic Data Processing (ADP) proporciona servicios de gestión de nóminas para miles de empresas. *Véase* el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "Externalización, pero no a la India, sino a lugares remotos de Estados Unidos".

La producción externalizada se está convirtiendo en una práctica habitual en muchas industrias, desde la informática hasta los automóviles. Gran parte del trabajo de ensamblaje de las computadoras de IBM está externalizado a una empresa especializada en ensamblaje electrónico, Solectron. Y la producción del Chrysler Crossfire, el Audi A4 descapotable y el Mercedes CLK descapotable está externalizada a Wilheim Karmann en Osnabruck, Alemania. A veces, la externalización puede adoptar formas poco habituales, como es el caso de la biblioteca pública de Salt Lake City, que externaliza la fundición de más de 2.000 paneles a Pretecsa en México, para transportarlos después a 3.5000 km al norte, lo que indica la creciente importancia de la externalización.

ÉTICA EN LA CADENA DE SUMINISTROS

Como hemos ido recalcando a lo largo de este texto, las decisiones éticas son críticas para el éxito a largo plazo de cualquier organización. Sin embargo, la cadena de suministros es particularmente propensa a deslices, puesto que las oportunidades para comportarse de forma poco ética son enormes. Con un personal de ventas ansioso por vender, y agentes de compras que gastan enormes cantidades, la tentación de un comportamiento poco ético es considerable. Muchos vendedores terminan haciéndose amigos de sus clientes, haciéndoles favores, llevándoselos a comer, o dándoles pequeños (o grandes) regalos. Definir cuándo un obsequio de amistad se convierte en un soborno es un reto. Muchas empresas tienen reglas y códigos de conducta estrictos que limitan lo que se considera aceptable. Al ser consciente de estos problemas, el Institute for Supply Management ha desarrollado principios y normas que pueden utilizarse como líneas directrices para un comportamiento ético. Se muestran en la Tabla 1.5.

A medida que la cadena de suministros se hace más internacional, los directores de operaciones tienen que esperar que surja todo un conjunto adicional de cuestiones éticas

TABLA 1.5 ■ Principios y normas de comportamiento ético en la dirección de la cadena de suministros

LEALTAD A SU ORGANIZACIÓN
JUSTICIA PARA AQUELLOS CON LOS QUE TRATA
FE EN SU PROFESIÓN

De estos principios se derivan las normas ISM de comportamiento en la gestión de suministros. (Global).

1. Evite la apariencia y la intención de prácticas poco éticas o comprometedoras en las relaciones, acciones y comunicaciones.
2. Demuestre lealtad al empresario aplicando diligentemente las instrucciones lícitas del empresario, utilizando un cuidado razonable y la autoridad recibida.
3. Evite cualquier actividad profesional o personal en los negocios que cree un conflicto entre sus intereses personales y los de su empleador.
4. Evite solicitar o aceptar dinero, préstamos, créditos o descuentos preferentes, y la aceptación de regalos, entretenimiento, favores o servicios, de proveedores actuales o potenciales, que puedan influir, o den la apariencia de influir, en sus decisiones de gestión de suministros.
5. Trate la información confidencial o privada con el debido cuidado y la pertinente consideración a las ramificaciones legales y éticas y a las normativas gubernamentales.
6. Promueva unas relaciones positivas con los proveedores mediante la cortesía y la imparcialidad.
7. Evite acuerdos deshonestos.
8. Conozca y cumpla la letra y el espíritu de las leyes aplicables a la gestión de suministros.
9. Fomente el apoyo a empresas pequeñas, en desventaja, y propiedad de minorías.
10. Adquiera y mantenga una competencia profesional.
11. Realice las actividades de gestión de suministros de acuerdo con las leyes, costumbres y prácticas nacionales e internacionales, las políticas de su organización, y estos principios éticos y normas de conducta.
12. Mejore la talla de la profesión de la gestión de suministros.

Fuente: Institute for Supply Management™, aprobado en enero de 2002; **www.ism.ws/ISMmembership/PrincipleStandards.cfm**.

al tener que trabajar con distintas normativas laborales, culturas, y todo un nuevo conjunto de valores. Por ejemplo, en 2004, Gap Inc. informó que de sus más de 3.000 fábricas en todo el mundo, aproximadamente el 90 por ciento no había superado su evaluación inicial[2]. El informe indicaba que entre el 10 y el 25 por ciento de sus fábricas chinas estaba implicado en abusos psicológicos o verbales, y más del 50 por ciento de las fábricas visitadas en el África subsahariana operaba sin los adecuados dispositivos de seguridad. El reto de la ética en la cadena de suministros es importante, pero las empresas responsables como Gap están encontrando maneras de tratar esta difícil cuestión.

ESTRATEGIAS DE CADENA DE SUMINISTROS



Gestión de la cadena de suministros en Regal Marine

La empresa debe decidir qué estrategia de cadena de suministros seguirá para la obtención de bienes y servicios de fuentes externas. Una de estas estrategias es el enfoque de *negociación con muchos proveedores*, y enfrentar a los proveedores unos contra otros. Una segunda estrategia consiste en desarrollar una relación de "*asociación*" *a largo plazo* con uno pocos proveedores, para satisfacer al cliente final. Una tercera estrategia es la *integración vertical*, en la que la empresa decide utilizar integración vertical hacia atrás, comprando, de hecho, al proveedor. Una cuarta variación es la combinación de unos pocos proveedores y la integración vertical, conocida como un *keiretsu.* En un *keiretsu*, *los proveedores forman parte de una coalición de empresas*. Por último, una quinta estrategia es desarrollar empresas virtuales *que utilizan proveedores en función de las necesidades*. A continuación explicaremos cada una de estas estrategias.

Muchos proveedores

Con la estrategia de muchos proveedores, el proveedor responde a las demandas y especificaciones de una "solicitud de presupuesto" de la empresa, y normalmente se adjudica el pedido al proveedor que ofrezca un menor presupuesto. Es una estrategia común cuando los productos son totalmente estándar (*commodity*). Esta estrategia enfrenta a los proveedores, y coloca el peso de cumplir las demandas del comprador sobre el proveedor. Los proveedores compiten de forma agresiva entre sí. Aunque con esta estrategia se pueden utilizar diferentes enfoques de negociación, es evidente que su objetivo no son las relaciones de "asociación" a largo plazo. Este enfoque considera que el proveedor es responsable de mantener la necesaria tecnología, las habilidades y las aptitudes de previsión, así como competencia en coste, calidad y entrega.

Pocos proveedores

Una estrategia de pocos proveedores implica que en lugar de buscar atributos a corto plazo, tales como un bajo coste, el comprador busca establecer una relación a largo plazo con unos pocos proveedores especializados. Los proveedores a largo plazo probablemente comprendan mejor los objetivos generales de la empresa y del cliente final. Utilizando pocos proveedores, se puede crear valor permitiéndoles alcanzar economías de escala y una curva de aprendizaje que produzca bajos costes de transacción y de producción.

Pocos proveedores, cada uno con un gran compromiso con el comprador, pueden estar más dispuestos a participar en sistemas justo a tiempo (JIT), así como a proporcionar innovaciones de diseño y experiencia tecnológica. Muchas empresas se han movido con empu-

---

[2] Amy Merrick, "Gap Offers Unusual Look at Factory Conditions", *The Wall Street Journal* (12 de mayo de 2004): A1, A12.

je y dinamismo para incorporar a proveedores en sus sistemas de suministro. DaimlerChrysler, por lo pronto, actualmente trata de escoger a los proveedores incluso antes de que se hayan diseñado los componentes. Motorola también evalúa a los proveedores con criterios rigurosos, pero en muchos casos ha eliminando las tradicionales pujas de proveedores, poniendo mayor énfasis en la calidad y en la fiabilidad. En ocasiones, estas relaciones originan contratos que se extienden a lo largo de todo el ciclo de vida del producto. Se espera que el comprador y el proveedor colaboren, haciéndose más eficientes y reduciendo precios a lo largo del tiempo. El resultado lógico de estas relaciones es muchos menos proveedores, pero aquellos que permanecen como tales tienen relaciones a largo plazo.

Hace casi 100 años, Henry Ford se rodeó de proveedores de confianza, muchos de su propiedad, con lo que logró que sus operaciones de montaje fueran casi autosuficientes.

Algunas empresas de servicios, como la minorista británica Marks & Spencer, han demostrado también que la cooperación con los proveedores puede producir ahorros de costes tanto para los proveedores como para los clientes. Esta estrategia ha tenido como resultado a proveedores que desarrollan nuevos productos, y ha logrado clientes para Marks & Spencer y para el proveedor. La tendencia hacia una estrecha integración entre proveedores y compradores se está produciendo tanto en las manufacturas como en los servicios.

Como en todas las estrategias, existe una desventaja. Con pocos proveedores, el coste de cambiar de socio es enorme, por lo que el proveedor y el comprador corren el riesgo de convertirse en prisioneros el uno del otro. Un bajo rendimiento en un proveedor es sólo uno de los riesgos que afronta el comprador. El comprador también debe preocuparse por los secretos comerciales y por los proveedores que pueden realizar otras alianzas o emprender sus propios negocios. Esto ocurrió, por ejemplo, cuando U.S. Schwinn Bicycle Co, necesitando capacidad adicional, enseñó a Giant Manufacturing Company, de Taiwán, a fabricar y vender bicicletas. Actualmente, Giant Manufacturing Company es el mayor fabricante de bicicletas del mundo, y Schwinn fue adquirida por Pacific Cycle LLC cuando estaba en quiebra.

Integración vertical

Integración vertical Desarrollo de la habilidad de producir bienes y servicios que anteriormente se adquirían a terceros, o la adquisición real de un proveedor o distribuidor.

La función de compras puede ser ampliada hasta tomar la forma de una integración vertical. Por **integración vertical** nos referimos a la habilidad de producir bienes y servicios que anteriormente se compraban en el exterior, o a la compra, de hecho, de un proveedor o un distribuidor. Como se muestra en la Figura 1.2, *la integración vertical puede ser hacia delante o hacia atrás.*

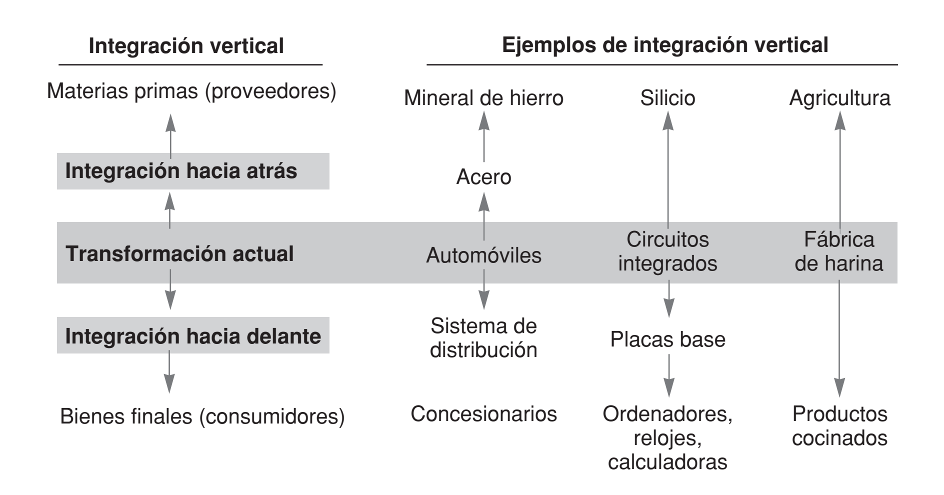


FIGURA 1.2 ■ La integración vertical puede ser hacia delante o hacia atrás

La integración hacia atrás indica que una empresa adquiere a sus proveedores, como en el caso de Ford Motor Company, que fabrican sus propios receptores de radio de automóvil. Por otro lado, la integración hacia delante sugiere que un productor de componentes fabrica el producto final. Un ejemplo es Texas Instruments, que es un fabricante de circuitos integrados que también fabrica calculadoras y televisores de pantalla plana que contienen circuitos integrados.

La integración vertical puede ofrecer una oportunidad estratégica para el director de operaciones. Para empresas que posean el capital necesario, el talento directivo y la demanda necesaria, la integración vertical puede proporcionar importantes oportunidades de reducción de costes, observancia de calidad y entregas a tiempo. A éstas se pueden añadir otras ventajas, como reducción de inventarios y mejor planificación, para las empresas que gestionen de forma eficaz la integración vertical, o establezcan relaciones mutuamente beneficiosas con los proveedores.

Debido a que los productos comprados representan una gran proporción de los costes sobre ventas, es obvio por qué tantas empresas encuentran interesante la integración vertical. La integración vertical parece funcionar mejor cuando la organización tiene una gran cuota de mercado y el talento de gestión necesario para dirigir con éxito las actividades del proveedor adquirido.

El incesante avance hacia la especialización continúa, lo que significa que cada vez es más difícil un modelo de "hacerlo todo" o de "integración vertical". La integración hacia atrás puede ser especialmente peligrosa para aquellas empresas que están en sectores en cambio tecnológico, si la dirección no es capaz de mantenerse al corriente de esos cambios o de invertir los recursos financieros necesarios para la siguiente ola de tecnología. La alternativa, sobre todo en industrias de alta tecnología, consiste en crear estrechas relaciones con los proveedores. Esto permite a los socios centrarse en su contribución específica. Los costes de investigación y desarrollo son demasiado elevados, y los cambios tecnológicos demasiado rápidos, como para que una sola empresa sostenga el liderazgo en cada uno de los componentes de las muchas líneas de productos. La mayoría de las organizaciones puede funcionar mejor concentrándose en su especialidad y apoyándose en las contribuciones de los socios. Existen excepciones. Cuando capital, talento directivo y tecnología están disponibles, y los componentes están también muy integrados, como el caso de Sanford Corporation, la integración vertical puede tener sentido. Por otra parte, no tenía sentido que Jaguar fabricara los componentes commodity de sus automóviles como lo hacía hasta que fue adquirida por Ford.

Las redes *keiretsu*

Muchos grandes productores japoneses han encontrado el término medio entre comprar a pocos proveedores y la integración vertical. Estos fabricantes son a menudo apoyo financiero de los proveedores mediante su participación en la propiedad o mediante préstamos. El proveedor pasa entonces a formar parte de una coalición de empresas denominada ***keiretsu***. Los miembros del *keiretsu* tienen garantizadas unas relaciones a largo plazo, y se espera que trabajen como socios, proporcionando al fabricante su experiencia técnica y una producción de calidad estable. Los miembros del *keiretsu* pueden también tener proveedores más abajo en la cadena y, por este motivo, los proveedores de segundo y tercer nivel también forman parte de la coalición.

Keiretsu
Término japonés para describir a los proveedores que forman parte de una coalición de empresas.

Las empresas virtuales

Como se ha dicho antes, las limitaciones de la integración vertical son importantes. Nuestra sociedad tecnológica requiere continuamente una mayor especialización, lo que com-

Empresas virtuales
Empresas que se basan en diversas relaciones con los proveedores para proporcionar los servicios que se demandan. También se las conoce como empresas huecas o empresas en red.

plica cada vez más la integración vertical. Además, una empresa que tenga un departamento o una división propia para cada cosa puede ser demasiado burocrática para dar la talla a escala mundial. Por lo tanto, en lugar de permitir que la integración vertical bloquee a la empresa en un negocio que pueda no entender o ser incapaz de gestionar, otro enfoque posible es encontrar proveedores buenos y flexibles. Las **empresas virtuales** se basan en una variedad de relaciones con los proveedores para proporcionar los servicios que se demandan. Las empresas virtuales tienen unas líneas divisorias organizativas fluidas y móviles, lo que les permite crear una empresa excepcional para satisfacer las cambiantes demandas del mercado. Los proveedores pueden proporcionar diversos servicios que incluyen la gestión de nóminas, la contratación del personal, el diseño de productos, la prestación de servicios de consultoría, la fabricación de componentes, la realización de pruebas o la distribución de los productos. Las relaciones pueden ser a corto o a largo plazo, y pueden incluir a auténticos socios, a colaboradores, o simplemente a proveedores o subcontratistas capaces. Independientemente de cuál sea la relación formal, el resultado puede ser un rendimiento excepcionalmente grande. Entre las ventajas de las empresas virtuales se encuentran la experiencia de gestión especializada, la baja inversión de capital, la flexibilidad y la rapidez. El resultado es la eficiencia.

Cada empresa juzga cuál debe ser su grado adecuado de integración vertical. Jaguar ha cambiado su postura hacia la integración vertical. En el pasado, Jaguar fabricaba prácticamente cada componente que podía, incluso algunos artículos simples como las arandelas. Sin embargo, Jaguar centra ahora su atención en esas piezas que hacen que un automóvil sea único: la carrocería, el motor y la suspensión. Los proveedores externos con sus propias capacidades, experiencia y eficiencia suministran el resto de los componentes.

El negocio de la confección es un ejemplo *tradicional* de organizaciones virtuales. Los diseñadores de ropa rara vez fabrican sus diseños; en lugar de ello, otorgan una licencia de fabricación. Los fabricantes pueden, a continuación, alquilar un local y máquinas de coser, y contratar mano de obra. El resultado es una empresa con pocos gastos generales, que es flexible y que puede responder rápidamente al mercado.

Un ejemplo *contemporáneo* es la industria de los semiconductores, ejemplificada por Visioneer en Palo Alto. Esta empresa de California subcontrata casi todo: diferentes "socios" escriben el software, el hardware lo fabrica un subcontratista en Silicon Valley, las placas de circuitos impresos se fabrican en Singapur, y las cajas de plástico se fabrican en Boston, donde las unidades se prueban y empaquetan para el transporte. En la empresa virtual la función de compras es exigente y dinámica.

GESTIONANDO LA CADENA DE SUMINISTROS

A medida que los directivos se mueven en sus decisiones hacia la integración de la cadena de suministros, es posible lograr eficiencias considerables. El ciclo de los materiales, a medida que fluyen desde los proveedores, a producción, a almacenes, a distribución y al cliente, tiene lugar entre organizaciones separadas y, a menudo, muy independientes. Por lo tanto, pueden surgir problemas importantes de gestión que pueden dar lugar a graves ineficiencias. El éxito empieza con un acuerdo mutuo sobre objetivos, seguido de una confianza mutua, y continúa con unas culturas organizativas compatibles.



Cadena de suministros del Hospital Arnold Palmer

Acuerdo mutuo sobre objetivos Una cadena de suministros integrada requiere algo más que un mero acuerdo sobre los términos contractuales de una relación de compra/venta. Los socios de la cadena deben darse cuenta de que la única entidad que aporta dinero a la cadena de suministros es el cliente final. Por lo tanto, es esencial establecer un mutuo entendimiento en la misión, la estrategia y los objetivos de las organizaciones participantes. La cadena de suministros integrada busca añadir valor económico y maximizar el contenido total del producto.

Debe tratarse al proveedor como una extensión de la empresa.

Confianza La confianza es fundamental para una cadena de suministros eficiente y eficaz. Los miembros de la cadena deben entrar en una relación de compartir información, una relación construida sobre la confianza mutua. Las relaciones entre los suministradores

tienen más probabilidades de tener éxito si se comparten riesgos y ahorros de costes, y si actividades como los estudios sobre el cliente final, análisis de ventas, previsiones y planificación de la producción son actividades conjuntas.

Culturas organizativas compatibles Una relación positiva entre las organizaciones compradora y proveedora que proviene de la compatibilidad de sus culturas organizativas puede ser una auténtica ventaja para hacer que la cadena de suministros funcione. Un "líder" en una de las dos empresas promueve a la vez contactos formales e informales, y esos contactos contribuyen al alineamiento de las culturas organizativas, fortaleciendo cada vez más la relación.

El director de operaciones está tratando con una cadena de suministros compuesta por especialistas independientes, y cada uno de éstos intenta satisfacer a sus propios clientes para obtener un beneficio. Esto da lugar a acciones que podrían no optimizar toda la cadena. Por otra parte, la cadena de suministros está llena de oportunidades para reducir derroches y aumentar valor. Vamos a fijarnos ahora en algunos de los problemas y oportunidades más importantes.

Problemas en una cadena de suministros integrada

Hay tres cuestiones que complican el desarrollo de una cadena de suministros integrada y eficiente: la optimización local, los incentivos y los grandes lotes.

Optimización local Los miembros de la cadena tienden a centrarse en obtener el máximo beneficio local o en reducir al mínimo el coste inmediato basándose en su conocimiento limitado de toda la cadena. Ligeros repuntes en la demanda son compensados en exceso porque nadie quiere quedarse sin existencias. De la misma manera, una ligera caída de la demanda se sobrecompensa porque nadie quiere encontrarse con demasiado inventario sin vender. En consecuencia, las fluctuaciones se magnifican. Por ejemplo, un distribuidor de pasta no quiere quedarse sin pasta para sus clientes minoristas; la respuesta natural a un gran pedido extraordinario consiste en compensarla con un pedido aún mayor al fabricante, partiendo del supuesto de que las ventas están repuntando. Ni el distribuidor ni el fabricante saben que el minorista ha realizado una importante promoción puntual que ha vendido mucha pasta. Éste es precisamente el problema que complicó la implementación de una distribución eficiente al fabricante de pasta italiana Barilla.

Incentivos (incentivos de ventas, descuentos por cantidad, cuotas y promociones) Los incentivos, del tipo que sean, promocionan a las mercancías en la cadena de suministros, promoviendo ventas que aún no se habían producido. Esto genera fluctuaciones que, en última instancia, resultan caras para todos los miembros de la cadena.

Grandes lotes Hay a menudo un sesgo hacia los grandes lotes porque éstos tienden a reducir los costes unitarios. El director de logística quiere enviar grandes lotes, preferiblemente en camiones llenos, y el director de producción quiere grandes tandas de producción. Ambas acciones reducen el coste unitario, pero no logran reflejar las ventas reales.

Estas tres situaciones corrientes (optimización local, incentivos y grandes lotes) contribuyen a distorsionar la información sobre lo que está ocurriendo realmente en la cadena de suministros. Un sistema de suministros bien gestionado necesita basarse en una información exacta sobre qué cantidad de productos deben reponerse realmente en la cadena, es decir, cuál es en realidad la demanda. La información imprecisa no es intencionada, pero da lugar a distorsiones y fluctuaciones en la cadena de suministros y provoca lo que se conoce como el efecto látigo (efecto *bullwhip*).

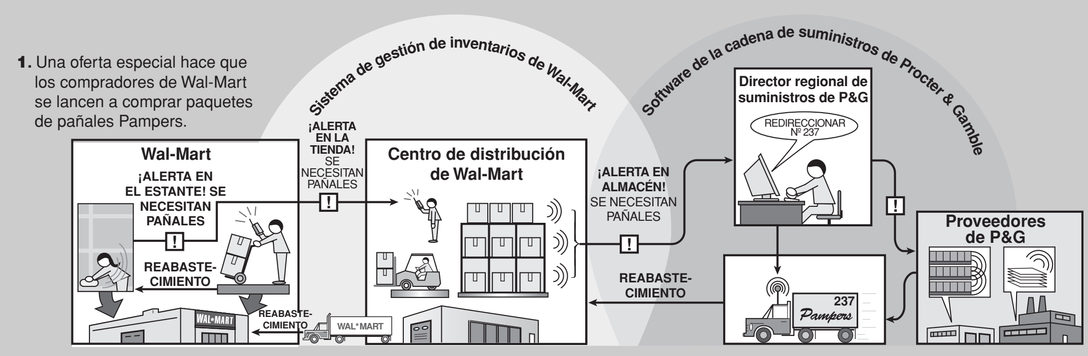
Efecto látigo (*bullwhip*)
La creciente fluctuación de los pedidos que se suele producir a medida que éstos se mueven por la cadena de suministros.

El **efecto látigo** se produce a medida que los pedidos se van transmitiendo de los minoristas a los mayoristas, y de éstos a los fabricantes, con fluctuaciones que aumentan en cada paso de la secuencia. Las fluctuaciones "látigo" en la cadena de suministros aumentan los costes de inventario, transporte, envío y recepción, al tiempo que reducen el servicio al cliente y la rentabilidad. Procter & Gamble descubrió que, aunque la utilización de pañales Pampers era constante, y los pedidos de las tiendas minoristas tenían pocas fluctuaciones, a medida que los pedidos avanzaban por la cadena de suministros, las fluctuaciones iban aumentando. Cuando los pedidos llegaban hasta el nivel de las materias primas, la variabilidad era considerable[3]. Se ha observado y documentado un comportamiento parecido en muchas empresas, entre ellas Campbell Soup, Hewlett-Packard y Applied Materials[4]. Existe un conjunto de oportunidades para reducir el efecto látigo y mejorar las oportunidades en la cadena de suministros. Se analizan en la sección siguiente.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

ETIQUETAS DE RADIOFRECUENCIA: CÓMO MANTENER LLENOS LOS ESTANTES

La cadena de suministros funciona sin complicaciones cuando las ventas son constantes, pero a menudo se descontrolan cuando surge un incremento repentino de la demanda. Las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (Radio Frequency IDentification, RFID) podrían cambiar esta situación al proporcionar información en tiempo real sobre lo que está ocurriendo en los estantes de las tiendas. He aquí cómo funciona el sistema.



2. Cada paquete de pañales Pampers tiene una etiqueta RFID. Los escáneres incorporados en los estantes alertan al almacén de la urgente necesidad de reabastecer el estante.

3. El sistema de gestión de inventarios de Wal-Mart hace un seguimiento constante y conecta sus existencias en el supermercado con las existencias en su almacén, desencadenando un reabastecimiento más rápido y proporcionando datos precisos en tiempo real.

4. Los sistemas de Wal-Mart están conectados con el sistema de gestión de la cadena de suministros de P&G. Las puntas de demanda notificadas por las etiquetas RFID son visibles de inmediato en toda la cadena de suministros.

5. El software de logística de P&G hace un seguimiento permanente de sus camiones con un sistema GPS y hace un seguimiento del contenido en los camiones gracias a los lectores de etiquetas RFID. Los directivos regionales pueden redirigir los camiones para satisfacer necesidades urgentes.

6. Los proveedores de P&G también utilizan etiquetas y lectores de RFID en sus materias primas, lo que proporciona a P&G visibilidad en varios niveles de la cadena de suministros, y proporciona a los proveedores la capacidad de prever con precisión la demanda y la producción.

Fuentes: Business 2.0 (mayo de 2002): 86; *y Grocer* (13 de abril de 2002): 18.

[3] Roger D. H. Warburton, "An Analytical Investigation of the Bullwhip Effect", *Production and Operations Management* 13, n.º 2 (verano de 2004): 150-160; y Hau L. Lee, V. Padmanabhan y W. Whang, "The Bullwhip Effect in Supply Chains", *MIT Sloan Management Review* (primavera de 1997): 93-106.

[4] Robert Ristelhueber, "Supply Chain Strategies – Applied Materials Seek to Snap Bullwhip Effect", *EBN* (22 de enero de 2001): 61.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

LA CADENA DE SUMINISTROS DE PENNEY PARA CAMISAS DE ETIQUETA

Compre un martes una camisa de etiqueta antiarrugas blanca Stafford, talla 17 de cuello, 34/35 de manga, en la tienda Penney del centro comercial Norhlake de Atlanta y la cadena de suministros reacciona. En un día, TAL Apparel Ltd. de Hong Kong descarga un registro de la venta. Tras ejecutar su modelo de previsión, TAL decide cuántas camisas va a hacer, y en qué estilos, colores y tallas. El miércoles por la tarde, la camisa para sustitución de la vendida es embalada y enviada directamente a la tienda de Penney en el centro comercial Norhlake. El sistema hace que la camisa no pase por el almacén de Penney, ni por ningún otro almacén, ni tampoco llega a los responsables de la toma de decisiones de Penney.

En una segunda ocasión, se venden dos camisas y no queda ninguna más en inventario. TAL, tras descargar los datos, ejecuta su modelo de previsión y decide que esta tienda tiene que tener dos camisas en inventario. Sin consultar a Penney, una fábrica de TAL en Taiwán hace dos nuevas camisas. Envía una por barco pero, dada la situación de desabastecimiento, envía la otra por avión.

A la vez que los comerciantes tienen que tratar con la personalización en masa, las modas pasajeras y los cambios estacionales, también tienen que intentar reducir los costes, por lo que resulta crítico disponer de una cadena de suministros de respuesta rápida. Antes de la globalización de su cadena de suministros, Penney tenía miles de camisas almacenadas a lo largo del país. Ahora las tiendas de Penney, como las de otras muchas cadenas detallistas, tienen un inventario de camisas muy reducido.

El proveedor de Penney, TAL, facilita tanto previsiones de ventas como gestión de inventarios, una situación que no es aceptable para muchos detallistas. Pero lo que resulta más sorprendente aún es que TAL también hace sus propios pedidos. Una cadena de suministros como ésta sólo funciona cuando hay confianza entre los socios. Los rápidos cambios en la gestión de la cadena de suministros no sólo suponen mayores exigencias técnicas a los proveedores, sino que también demandan una mayor confianza entre las partes.

Fuentes: The Wall Street Journal (11 de septiembre de 2003): A1, A9; y *Marketing Magazine* (22 de septiembre de 2003): 34.

Oportunidades en una cadena de suministros integrada

Las oportunidades para una gestión eficaz en la cadena de suministros comprenden los diez siguientes aspectos.

Información "de arrastre (*pull*)" exacta Genere **información "de arrastre (*pull*)"** precisa compartiendo (1) la información obtenida en el punto de venta (*Point-of-sales,* POS) de forma que cada miembro de la cadena pueda hacer una programación eficaz y (2) sistemas de pedidos asistidos por computadora (*Computer-Assisted Ordering,* CAO). Esto implica que hay que utilizar sistemas de punto de venta para recopilar datos sobre ventas y, después, ajustar esos datos en función de factores del mercado, inventarios existentes y pedidos extraordinarios. A continuación se envía un pedido neto directamente al proveedor que es responsable del mantenimiento del inventario de productos acabados.

Información de arrastre (pull)
Datos de ventas exactos que inician las transacciones para "tirar" del producto a través de la cadena de suministros.

Reducción del tamaño de los lotes Reduzca el tamaño de los lotes mediante una gestión agresiva. Esta gestión puede incluir (1) desarrollo de envíos económicos de lotes inferiores a la carga de un camión; (2) oferta de descuentos en función del volumen anual total en vez de en función del tamaño de envíos individuales, y (3) reducción del coste de los pedidos mediante técnicas como los pedidos abiertos y diferentes formas de compra electrónica.

Control del reabastecimiento en una única etapa
Fijar la responsabilidad de supervisar y gestionar los inventarios, por ejemplo, por el minorista.

Control del reabastecimiento en una única etapa El **control del reabastecimiento en una única etapa** significa que se designa a un miembro de la cadena como responsable de supervisar y gestionar el inventario en la cadena de suministros a partir del "arrastre" des-

de el usuario final. Este enfoque suprime información distorsionada y múltiples previsiones que crean el efecto látigo. El control puede estar en manos de:

- Un ***minorista*** sofisticado que comprenda los patrones de la demanda. En el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "Etiquetas de radiofrecuencia: cómo mantener llenos los estantes" se explica cómo consigue hacerlo Wal-Mart con algunos de sus productos en inventario gracias a las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (IRF).
- Un ***distribuidor*** que gestiona el inventario para una determinada área de distribución. Los distribuidores que mueven artículos de alimentación, cerveza y refrescos pueden hacerlo. Anheuser-Busch gestiona los inventarios y entregas de cerveza de muchos de sus clientes.
- Un ***fabricante*** que tiene un sistema de previsiones, producción y distribución bien gestionado. TAL Apparel Ltd., que se analiza en el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "La cadena de suministros de Penney para camisas de etiqueta", lo hace para Penney.

Inventario gestionad por el proveedor
El proveedor mantiene los materiales para el comprador y a menudo los entrega directamente al departamento que los utiliza en el comprador.

Inventario gestionado por el proveedor El **inventario gestionado por el proveedor** significa que se recurre a un proveedor local (normalmente, un distribuidor) para mantener los inventarios de un fabricante o de un minorista. El proveedor entrega el producto directamente al departamento correspondiente del comprador, en vez de a un muelle de recepción o a un almacén. Si el proveedor puede mantener los inventarios de diferentes clientes que utilizan el mismo producto, o cuyas diferencias son menores (por ejemplo, en la etapa de embalaje), entonces se lograrán ahorros netos. Estos sistemas funcionan sin la gestión directa del comprador.

Aplazamiento
Retrasar las modificaciones o la personalización del producto el mayor tiempo posible a lo largo del proceso de producción.

Aplazamiento El **aplazamiento** retrasa toda modificación o personalización del producto (manteniéndolo genérico) el mayor tiempo posible. Por ejemplo, después de analizar la cadena de suministros de sus impresoras, Hewlett-Packard (H-P) determinó que si el sistema de alimentación eléctrica de la impresora se sacaba de ésta y se fabricaba un sistema de alimentación externo con cable, H-P podría transportar la impresora básica a cualquier parte del mundo. H-P modificó la impresora, su sistema de alimentación externo con cable, su embalaje y su documentación, de forma que sólo era necesario añadir en el punto final de distribución el sistema de alimentación externo con cable y la documentación correspondiente. Esta modificación permitió a la empresa fabricar y mantener inventarios centralizados de la impresora genérica para enviarlos en función de los cambios de la demanda. El sistema de alimentación y la documentación sólo se deben tener en cada país. Este conocimiento de la cadena de suministros completa redujo a la vez los riesgos y la inversión en inventario.

Canal de montaje
Posponer el montaje final de un producto, de forma que el canal de distribución lo pueda ensamblar.

Canal de montaje El canal de montaje es una variante del aplazamiento. El **canal de montaje** envía al distribuidor componentes individuales y módulos, en lugar de enviar el producto acabado. Entonces, el distribuidor ensambla, prueba y expide. El canal de montaje trata a los distribuidores más como si fueran socios de fabricación que distribuidores. Esta técnica ha tenido éxito en industrias donde los productos están experimentando cambios rápidos, como los PC. Con esta estrategia, se reduce el inventario de productos acabados, ya que los productos se montan en función de una previsión más cercana y exacta. En consecuencia, la respuesta al mercado es mejor, y con menor inversión, lo que constituye una buena combinación.

Drop shipping (tramitación de pedidos virtuales) y embalaje especial La **tramitación de pedidos virtuales (drop shipping)** implica que el proveedor realizará el transporte directamente al cliente final, en vez del vendedor, con lo que ambos ahorran tiempo y costes de reenvío. Otras medidas para reducir costes incluyen el uso de embalaje especial, de etiquetas, y de una óptima disposición de las etiquetas y de los códigos de barras en los contenedores. También puede indicarse la localización final del departamento adonde va el contenedor así como el número de unidades en cada contenedor. Utilizando técnicas de dirección como éstas, se pueden obtener ahorros importantes. Algunas de estas técnicas pueden ser particularmente beneficiosas para los mayoristas y minoristas al reducir las pérdidas (mercancías extraviadas, dañadas o robadas) y controlar los costes.

Drop shipping (tramitación de pedidos virtuales)
Enviar directamente desde el proveedor hasta el cliente final, en lugar de hacerlo a través de un vendedor, ahorrando costes de tiempo y de reenvío.

Por ejemplo, Dell Computer ha decidido que su competencia central no consiste en almacenar periféricos, sino en ensamblar PC. Por tanto, si se pide a Dell un PC con impresora y otros accesorios, la computadora vendrá de Dell, pero la impresora y el resto de los accesorios se transportarán desde la fábrica del fabricante correspondiente.

Pedidos abiertos Los pedidos abiertos son pedidos "permanentes" con el proveedor[5]. Un **pedido abierto** es un contrato con un proveedor para comprarle ciertos artículos. No es una autorización para que le envíe cualquier cosa. El envío sólo se puede hacer contra el recibo de un documento convenido, que puede ser una solicitud de envío o un lanzamiento de envío.

Pedidos abiertos
Compromiso de compra a un proveedor a largo plazo de artículos que se van suministrando contra solicitudes de envío a corto plazo.

Estandarización El departamento de compras debería esforzarse por aumentar los niveles de **estandarización**. Es decir, en lugar de obtener una amplia gama de componentes similares con etiquetas, colores, embalaje, o quizá con especificaciones de ingeniería ligeramente diferentes, el agente de compras debería intentar tener estos componentes normalizados.

Estandarización
Reducir el número de variaciones en los materiales y en los componentes, para ayudar a reducir el coste.

Pedido electrónico y transferencia de fondos El pedido electrónico y la transferencia de fondos reducen las transacciones en papel. Las transacciones de documentos consisten en pedidos de compras, lanzamientos de compras, albaranes de recepción de mercancías, autorizaciones para pagar una factura (que se comparan con el albarán de recepción aprobado) y, por último, la emisión de cheques. Los departamentos de compras pueden reducir este aluvión de papeleo mediante los pedidos electrónicos, la aceptación de todos los materiales recibidos como buenos, y la transferencia electrónica de fondos para pagar las unidades recibidas. El pedido electrónico no sólo reduce el papeleo, sino que también agiliza el largo ciclo de aprovisionamiento tradicional.

Las transacciones entre empresas utilizan a menudo el intercambio electrónico de datos. El **intercambio electrónico de datos (EDI: *Electronic Data Interchange*)** es un formato normalizado de transmisión de datos para comunicaciones informatizadas entre empresas. El EDI permite transferir datos de prácticamente cualquier función empresarial, incluida la de compras. Empleando el EDI, por ejemplo, los datos para un pedido de compra, como la fecha del pedido, la fecha de entrega, la cantidad, el número de pieza, el número de pedido de compra, la dirección, etc., se ponen en formato EDI normalizado.

Intercambio electrónico de datos (EDI: *Electronic Data Interchange*)
Formato de transmisión de datos normalizado para las comunicaciones informatizadas entre las organizaciones.

Una ampliación del EDI es el **aviso anticipado de expedición (ASN: *Advanced Shipping Notice*)**, que es un aviso de envío que el proveedor transmite electrónicamente al comprador. Cuando el proveedor está preparado para enviar, se imprimen las etiquetas de transporte, y se crea el aviso anticipado de expedición que se transmite al comprador. Aun-

Aviso (notificación) de transporte adelantado (ASN: *Advanced Shipping Notice*)
Aviso de envío que el suministrador entrega directamente al comprador.

[5] Los pedidos por cubrir también se denominan pedidos "abiertos" o "incompletos".

que las fábricas y los minoristas utilizan esta técnica, la facilidad de uso y el bajo coste de Internet están sustituyendo al EDI y al ASN en su forma actual.

COMPRAS POR INTERNET

Compras por Internet (compras electrónicas) Lanzamientos de pedido comunicados a través de Internet o catálogos aprobados del proveedor disponibles en Internet para ser utilizados por los empleados de la empresa compradora.

Los sistemas más vanguardistas de la cadena de suministros combinan muchas de las técnicas anteriormente mencionadas en los sistemas de compra automatizada. La **compra por Internet**, que se suele llamar *e-procurement*, tiene muchas variantes. Vamos a analizar cuatro.

En **primer lugar**, la compra por Internet pueden implicar únicamente el uso de Internet para comunicar los lanzamientos de pedidos a los proveedores. Esto sucedería con los artículos para los que existe un pedido abierto. En esta aplicación, Internet sustituye al más tradicional intercambio electrónico de datos (EDI) con un lanzamiento de pedidos al proveedor vía Internet.

En **segundo lugar**, para los artículos no estándar, para los que no hay un pedido abierto, los pedidos por catálogo pueden dar realce a las características de comunicación de Internet. En esta aplicación de compras por Internet, los acuerdos generales a largo plazo con suministradores autorizados se convierten en la colocación de catálogos online para su utilización por la empresa compradora. Con este tipo de sistemas se reduce el plazo de pedido y se controlan los costes de compra. Por ejemplo, la Universidad Estatal de San Diego (SDSU) utiliza el software para revisar el estado de los pedidos, para recibir facturas y acuses de recibo, y para generar informes de actividad. El contenido del catálogo de suministros de la SDSU es a tiempo real y está gestionado por el proveedor. Las transacciones de compra están integradas con el software financiero de la universidad, el cual está suministrado por Oracle. Texas Instruments ha instalado un sistema similar para reducir los costes de compra a la vez que mejora la disponibilidad de los artículos. Los empleados de Texas Instruments en cualquier parte del mundo, ahora realizan los pedidos directamente desde su mesa de oficina, y los datos de la transacción se traspasan automáticamente al software de planificación de los recursos de la empresa (ERP) de SAP. (Los programas SAP y ERP se abordan con más detalle en el Capítulo 4 de este texto).

En **tercer lugar**, la Figura 1.3 muestra un sistema de compras electrónicas tradicional, pero basado en Internet, utilizado por varios complejos de ocio de Las Vegas para controlar sus compras, que abarcan desde suministros de bajo coste para oficina hasta artículos de ingeniería de elevado coste, pasando por alimentos perecederos y bebidas. El solicitante inicia el proceso de compra electrónica preparando una solicitud de compra informatizada en la que se especifica artículo, cantidad y fecha requerida. A continuación, la solicitud se mueve electrónicamente hacia un comprador del departamento de compras. El comprador revisa la solicitud y transfiere los datos al sistema en Internet. A partir de una lista de proveedores preferidos mantenida por el departamento de compras, el comprador asigna la solicitud a proveedores cualificados para que oferten por ella. Así pues, el comprador es capaz de solicitar presupuestos a diversos proveedores en unos pocos segundos. En las solicitudes de compra se especifica la descripción del producto, la fecha de cierre y las condiciones de la oferta. Los proveedores, conectados al sistema de compra electrónica, reciben la petición de oferta de forma simultánea. Al cierre de la puja, el comprador revisa todas las ofertas (presupuestos) presentadas y elige al proveedor en función de calidad, coste y entrega. Finalmente, se envía un pedido de compra electrónicamente al proveedor elegido.

En **cuarto lugar**, Internet también se presta a subastas. Muchos artículos totalmente estándares (*commodities*), para los que no existen contratos a largo plazo, se compran ahora de forma muy económica a través de sitios de subastas en Internet. El suplemento de

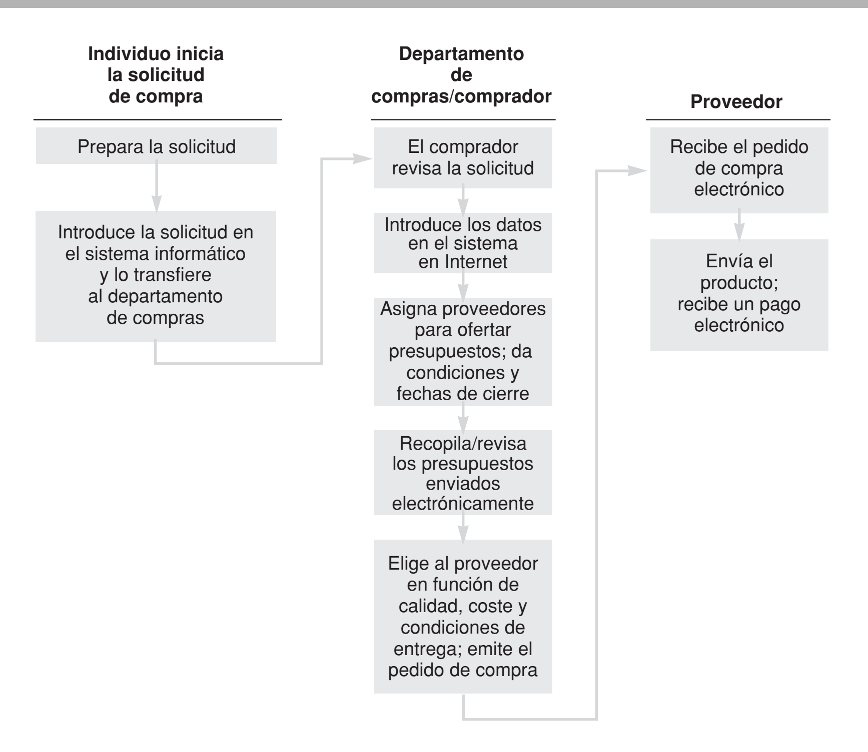


FIGURA 1.3 ■ Sistema de compras por Internet (e-*procurement*) de hoteles de Las Vegas

Fuentes: Adaptado de Joel D. Wisner, G. Keong Leong, y K. C. Tan, *Principles of Supply Chain Management* (Mason, Ohio: Thompson-Southweestern, 2005); y K. C. Tan y R. Dajalos, "Purchasing Strategy in the 21st Century", *PRACTIX: Best Practices in Purchasing and Supply Chain Management* 4, n.º 3 (2001): 7-12.

este capítulo, "Comercio electrónico y dirección de operaciones", analiza con más detalle las compras y subastas en Internet.

Independientemente de la forma que adopte el sistema de compra electrónica, a los proveedores les gusta porque vender online supone estar más cerca de los clientes. El cash-flow del proveedor también puede mejorar puesto que se reduce el tiempo total del ciclo (tiempo que transcurre entre que se hace el pedido, se entrega y se recibe el pago). Un incentivo añadido es que la inversión de capital en estos sistemas es baja. A los compradores les gusta la compra electrónica porque se presta a hacer comparaciones de precios, a realizar pedidos de forma rápida, y reduce los costes de transacción y los inventarios.

La compra por Internet puede formar parte de un sistema integrado de planificación de recursos de la empresa (ERP: *Enterprise Resource Planning*), con comunicación vía Internet entre las diferentes unidades de la cadena de suministros. En estos sistemas, el "lanzamiento de un pedido" no sólo dice al que ha de enviar que envíe, sino que también actualiza los módulos correspondientes del sistema ERP. En otras situaciones, menos integradas, los sistemas de compra por Internet pueden no formar parte de un sistema ERP completamente integrado. Pero incluso en estos sistemas, las compras se suelen registrar automáticamente en el sistema financiero y en el de inventarios de la empresa compradora, lo que reduce los costes de transacción internos.

SELECCIÓN DE PROVEEDORES

Para aquellos bienes y servicios que compra la empresa es necesario elegir a proveedores. La **selección de proveedores** tiene en cuenta varios factores, como la conveniencia estratégica, la competencia del proveedor, las condiciones de entrega y la calidad. Puesto que una empresa puede tener cierta competencia en todas las áreas, y competencia excepcional sólo en unas pocas, puede ser muy difícil hacer una buena selección de proveedores. A

Selección del proveedor Decisión sobre a quién se van a comprar materiales o servicios.

continuación examinaremos la selección de proveedores como un proceso de tres etapas: (1) evaluación del proveedor, (2) desarrollo del proveedor y (3) negociaciones.

Evaluación del proveedor

La primera etapa, *evaluación del proveedor*, implica encontrar proveedores potenciales y determinar la probabilidad de que lleguen a ser buenos proveedores. Esta fase requiere definir criterios de evaluación como los del Ejemplo 2. Tanto los criterios como las ponderaciones asignadas dependen de la estrategia que se quiere conseguir en la cadena de suministros (*véase* la Tabla 1.1 mostrada anteriormente en el capítulo).

La selección de proveedores competentes es fundamental. Si no se selecciona a buenos proveedores, todos los otros esfuerzos que se hagan en la cadena de suministros serán

EJEMPLO 2

Aproximación ponderada para la evaluación de proveedores

Hau Lee, presidente de Creative Toys en Palo Alto, está interesado en evaluar a los proveedores que colaborarán con él para fabricar pinturas y moldes ecológicos y no tóxicos para su línea de juguetes. Se trata de un elemento estratégico crítico de su cadena de suministros, y busca una empresa que contribuya a su producto. Inicia su análisis con un proveedor potencial, Faber Paint & Dye.

Solución

Hau revisa primero los atributos diferenciadores de los proveedores en la Tabla 1.1 y define la siguiente lista de criterios de selección[6]. A continuación asigna las ponderaciones mostradas más abajo, para ayudarle a hacer una revisión objetiva de los proveedores potenciales. Sus empleados asignan las puntuaciones que se muestran y él calcula la puntuación ponderada total.

Criterios	Ponderaciones	Puntuaciones (1-5) (5 máxima)	Ponderación × puntuación
Habilidades de ingeniería/investigación/innovación	0,20	5	1,0
Capacidad técnica del proceso de producción (flexibilidad/asistencia técnica)	0,15	4	0,6
Capacidad de distribución/entrega	0,05	4	0,2
Sistemas de calidad y su rendimiento	0,10	2	0,2
Instalaciones/localización	0,05	2	0,1
Fortaleza financiera y de gestión (estabilidad y estructura de costes)	0,15	4	0,6
Capacidad de sistemas de información (comercio electrónico, Internet)	0,10	2	0,2
Integridad (cumplimiento normativa medio ambiental/ética)	0,20	5	1,0
	1,00		3,9 Total

Faber Paint & Dye recibe una puntuación total de 3,9. Hau tiene ahora una base para compararlo con otros proveedores potenciales y elegir al que obtenga la máxima puntuación total.

[6] Se puede encontrar un análisis de los criterios de selección de proveedores en el Capítulo 8 de Robert Monczka, Robert Trent y Robert Handfield, *Purchasing and Supply Chain Management,* 2.ª edición (Mason, Ohio: Southwestern, 2002); y Capítulos 2 y 3 de Joel D. Wisner, G. Keong Leong y K. C. Tan, *Principles of Supply Chain Management* (Mason, Ohio: Southwestern, 2005).

inútiles. Como las empresas tienden a trabajar con sólo unos pocos proveedores a largo plazo, los aspectos de fortaleza financiera, de calidad, de gestión, de habilidad técnica y de potencial para una estrecha relación a largo plazo desempeñan un papel cada vez más importante. Estos atributos deben tenerse en cuenta en el proceso de evaluación.

Desarrollo del proveedor

La segunda etapa es el *desarrollo del proveedor*. Suponiendo que una empresa quiere trabajar con un proveedor determinado, ¿cómo integrar a este proveedor en su sistema? El comprador se asegura de que el proveedor comprende los requisitos de calidad, los cambios de ingeniería, los plazos y la entrega, el sistema de pago del comprador, y las políticas de aprovisionamiento. El *desarrollo del proveedor* puede incluir desde formación, a ayudas en ingeniería y producción, y a procedimientos para transferencia de información. También es necesario definir políticas de aprovisionamiento. Éstas pueden abordar cuestiones tales como el porcentaje del negocio que se lleva a cabo con cualquier proveedor o con empresas pertenecientes a minorías.

Negociaciones

Independientemente de la estrategia adoptada sobre la cadena de suministros, es necesario que se realicen negociaciones sobre los elementos críticos de la relación contractual. Estas negociaciones habitualmente se centran en calidad, entregas, pagos y costes. Vamos a centrarnos en tres clásicas **estrategias de negociación**: el modelo de precio basado en el coste, el modelo de precio en función del mercado, y la puja competitiva.

Estrategias de negociación
Enfoques tomados por el personal de la cadena de suministros para desarrollar relaciones contractuales con los proveedores.

Modelo del precio basado en el coste El *modelo del precio en función del coste* requiere que el proveedor revele su contabilidad de costes al comprador. El precio del contrato está entonces basado en el tiempo y los materiales empleados por el proveedor, o en un coste fijo con una cláusula de actualización para tener en cuenta los cambios en el coste de la mano de obra y de los materiales del proveedor.

Modelo del precio en función del mercado En el *modelo del precio en función del mercado,* el precio se basa en un precio publicado en algún boletín oficial, en una subasta o en un índice de precios. Muchos bienes primarios (productos agrícolas, papel, metal, etcétera) fijan sus precios de esta manera. Por ejemplo, los precios del cartón se pueden encontrar en la publicación semanal del *Official Board Markets* (**www.advanstar.com/subscribe/**)[7]. Los precios de los metales no ferrosos se publican en la revista *Platt's Metals Week* (**www.platts.com/plattsmetals/**) y los de otros metales en **www.metalworld.com**.

Puja competitiva Cuando los proveedores no están dispuestos a discutir los costes y donde no existen mercados casi perfectos, la puja competitiva es a menudo adecuada. Trabajos poco frecuentes (como construcción, adquisición de herramientas y moldes) se compran habitualmente basándose en la licitación competitiva. Las pujas se pueden enviar por correo, fax o en una subasta por Internet. La licitación competitiva es una política habitual en la mayoría de las compras de muchas empresas. Esta política exige que el agente de compras tenga varios proveedores potenciales del producto (o su equivalente) y presupuestos de cada uno. La principal desventaja de este método, como hemos indicado antes,

[7] El *yellow sheet* (la "hoja amarilla") es la denominación común del listado *Official Board Markets,* publicado por *Magazines for the Industry,* Chicago. Contiene anuncios de los precios del cartón para contenedores y cajas.

es que se dificulta el desarrollo de las relaciones a largo plazo entre el comprador y el proveedor. Las licitaciones competitivas pueden determinar inicialmente el coste de forma eficaz. Sin embargo, pueden dificultar la comunicación y el rendimiento, vitales para los cambios de ingeniería, la calidad y la entrega.

Las negociaciones no deben verse como un juego ganador/perdedor; pueden ser un juego en el que todo el mundo sale ganando, ganador/ganador.

Un cuarto enfoque consiste en *combinar una o más* de las técnicas de negociación precedentes. El proveedor y el comprador pueden acordar la revisión de ciertos datos de coste, aceptar algún tipo de datos del mercado sobre el coste de las materias primas, o acordar que el proveedor "continuará siendo competitivo". En cualquier caso, una buena relación con el proveedor es aquella en la que ambos socios, proveedor y comprador, han alcanzado un grado de confianza mutua, y creen en la competencia del otro.

GESTIÓN LOGÍSTICA

Gestión logística
Enfoque que busca eficiencia en las operaciones mediante la integración de toda la adquisición de materiales, de su movimiento y de las actividades de almacenaje.

Las actividades de aprovisionamiento se pueden combinar con diferentes actividades de envío, almacenaje e inventario, para constituir un sistema logístico. El objetivo de la **gestión logística** es conseguir la eficiencia de las operaciones mediante la integración de toda la adquisición de materiales, de su movimiento y de las actividades de almacenaje. Cuando los costes de transporte y de inventario son importantes en el proceso de producción, tanto por lo que respecta a las materias primas como por lo que respecta a los productos acabados, puede resultar pertinente poner el énfasis en la logística. Cuando los asuntos logísticos son caros o significativos, muchas empresas optan por la externalización de la función de logística. A menudo, los especialistas en logística pueden proporcionar conocimientos y experiencia no disponible entre el personal de la empresa. Por ejemplo, las empresas logísticas suelen tener tecnología de seguimiento que reduce las pérdidas de productos en el transporte y respaldan fechas de entrega que cumplen plazos de entrega precisos. El potencial para conseguir ventaja competitiva se encuentra por vía la reducción de costes y la mejora del servicio de atención al cliente.

Las empresas reconocen que la distribución de bienes a y desde sus instalaciones puede llegar a representar hasta el 25 por ciento del coste de los productos. Además, el total de los costes de distribución en Estados Unidos es superior al 10 por ciento del producto nacional bruto (PNB). Debido a este elevado coste, las empresas evalúan constantemente sus medios de distribución. Los cinco medios de distribución más importantes son el transporte por carretera, el transporte por ferrocarril, el transporte aéreo, el transporte fluvial y las tuberías.

En el puerto de Charleston, con 12 millones de contenedores que entran en Estados Unidos anualmente, el seguimiento de la ubicación, contenido, y condiciones de los camiones y contenedores es todo un reto. Pero las nuevas tecnologías están mejorando tanto la seguridad como los envíos justo a tiempo.

Sistemas de distribución

El transporte por carretera La gran mayoría de los bienes fabricados se transporta por carretera. La flexibilidad del transporte por carretera es sólo una de sus ventajas. Las empresas que han adoptado programas justo a tiempo durante los últimos años han presionado cada vez más a sus camioneros para realizar la recogida y la entrega a tiempo, sin daños, con la documentación en orden y a bajo coste. Las empresas de transporte por carretera están utilizando cada vez más sistemas informáticos para hacer seguimiento de la meteorología, encontrar la ruta más eficaz, reducir el coste de combustible y analizar la forma más eficiente para descargar. El presidente de UPS, James Kelly, describe a su empresa como "una cinta transportadora global", que realiza entregas justo a tiempo de materiales e informaciones en cualquier parte del mundo[8].

[8] "Overnight, Everything Changed for FedEx", *The Wall Street Journal* (4 de noviembre de 1999): A16.

El transporte por ferrocarril Los ferrocarriles de Estados Unidos tienen 250.000 empleados y transportan el 90 por ciento de todo el carbón, el 67 por ciento de los automóviles, el 68 por ciento de los productos de papel, y alrededor de la mitad de toda la comida, de las maderas y de los productos químicos. Los contenedores han hecho que el transporte intermodal de remolques de camión en vagones de ferrocarril, a menudo colocados en dos pisos, se haya convertido en uno de los medios más comunes de distribución. Más de 4 millones de contenedores de carga se transportan cada año por ferrocarril en Estados Unidos. Sin embargo, con el crecimiento del sistema justo a tiempo, el transporte por ferrocarril ha sido el gran perdedor, porque la fabricación de pequeños lotes necesita de envíos pequeños y frecuentes que es probable que se hagan vía camión o avión.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

EL PAPEL DE DHL EN LA CADENA DE SUMINISTROS

Estamos en plena noche en el centro de distribución aérea de DHL International en Bruselas, pero el enorme edificio está vivo con las carretillas elevadoras y los trabajadores de clasificación ocupados. Las cajas que suben y bajan del avión de DHL tienen desde computadoras de Dell y routers de Cisco hasta silenciadores de Caterpillar y bombas hidráulicas de Komatsu. Hay computadoras de Sun Microsystems de California destinadas a Finlandia, y CD-ROM de la planta de Teac en Malasia destinados a Bulgaria.

El movimiento de puerta a puerta de paquetes sensibles al tiempo es la clave para el comercio electrónico, los sistemas JIT, los cortos ciclos de vida de los productos, la personalización en masa, los reducidos inventarios y toda la cadena de suministros global. Las cadenas de suministros globales están en movimiento continuo, lo que resulta ideal para la industria de envíos urgentes por avión.

Con una red descentralizada que abarca 227 países y territorios (más de los que integran las Naciones Unidas), DHL es una auténtica multinacional. La sede de Bruselas sólo tiene a 450 de los 176.000 empleados de la empresa, pero incluye a 26 nacionalidades.

DHL ha creado una extensa red global de centros logísticos exprés para bienes estratégicos. En este centro logístico de Bruselas, por ejemplo, DHL mejora las prestaciones (*upgrade*), repara y configura las computadoras de Fijitsu, los proyectores InFocus y los equipos médicos de Johnson & Johnson. Almacena y provee componentes para EMC y Hewlett-Pacard, y reemplaza teléfonos Nokia y Philips. "Si algo se rompe un martes a las 4 de la tarde, el almacén pertinente lo sabe a las 4:05, y el componente se encuentra en un avión de DHL a las 7 u 8 de la tarde", comenta Robert Kuijpers, consejero delegado de DHL International.

Fuentes: Modern Materials Handling (octubre de 2002): *57; EBN* (25 de febrero de 2002): 27; y *Business World* (28 de abril de 2004): 1.

El transporte aéreo El transporte aéreo representa tan sólo el 1 por ciento del tonelaje transportado en Estados Unidos. Sin embargo, la reciente proliferación de transportistas aéreos como Federal Express, UPS y DHL ha hecho de este tipo de transporte el de más rápido crecimiento. Claramente, para transportes nacionales e internacionales de artículos ligeros, como suministros de material médico y de emergencias, flores, frutas y componentes electrónicos, el transporte aéreo ofrece rapidez y fiabilidad. *Véase* el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "El papel de DHL en la cadena de suministros".

El transporte fluvial El transporte fluvial es uno de los medios más antiguos de transporte de mercancías, que data de la construcción del canal Erie en 1817. El transporte fluvial en Estados Unidos se lleva a cabo en ríos, en canales, en los Grandes Lagos, en el litoral y en los océanos que se comunican con otros países. El cargamento que se transporta en este medio es voluminoso y de poco valor, como mineral de hierro, cereales, carbón, productos químicos, calizas y productos del petróleo. Este sistema de distribución es importante cuando el coste del transporte es más importante que la velocidad.

Siete explotaciones agrícolas a dos horas de distancia del Aeropuerto de Nairobi en Kenya proporcionan 300 toneladas de alubias, bok choy, calalú y otros productos agrícolas que se empaquetan en el aeropuerto y se envían por la noche a Europa. El tiempo entre la cosecha y la llegada a Europa es de dos días. Cuando trabajan juntas una buena cadena de suministros y una buena logística, los resultados pueden ser extraordinarios, y la comida fresca.

Tuberías Las tuberías son importantes para el transporte de petróleo en crudo, gas natural, y otros productos químicos y derivados del petróleo. Un asombroso 90 por ciento del presupuesto del Estado de Alaska proviene del millón y medio de barriles de petróleo que se bombean diariamente en Prudhoe Bay.

Coste de las diferentes alternativas de envío

Cuanto más tiempo está un producto en tránsito, más tiempo tiene la empresa invertido su dinero. Pero el transporte rápido suele ser más caro que el transporte lento. Una forma sencilla de comprender este equilibrio entre inversión y rapidez consiste en evaluar el coste del transporte con las distintas opciones disponibles de transporte. Lo hacemos en el Ejemplo 3.

El Ejemplo 3 sólo compara los costes de almacenamiento con los costes de envío. Para el director de operaciones o de logística, hay otros muchos factores a tener en cuenta, entre ellos la coordinación de los envíos para cumplir los plazos, conseguir sacar un nuevo producto al mercado y mantener contento al consumidor[9]. No hay ninguna razón para que las estimaciones de estos otros costes no se puedan añadir a la estimación del coste de almacenamiento diario. El cálculo del impacto y del coste de estas otras muchas consideraciones es lo que hace interesante la evaluación de las alternativas de transporte.

Logística, seguridad y JIT

Es probable que no haya ninguna sociedad más abierta que la estadounidense. Esto incluye sus fronteras y sus puertos. Con la desaparición de las últimas restricciones del Acuerdo de Libre Comercio de Norteamérica (ALCNA/NAFTA), la expansión de la globaliza-

EJEMPLO 3

Cálculo del coste diario de almacenamiento

Un envío de nuevos conectores para semiconductores tiene que ir de San José a Singapur para su ensamblaje. El valor de los conectores asciende a 1.750.000 dólares, y el coste de almacenamiento asciende al 40 por ciento al año. Una compañía de transporte aéreo puede tardar en enviar los conectores un día menos que otra empresa de transporte aéreo competidora, a un coste adicional de 20 dólares.

Primero calculamos el coste de almacenamiento diario.

Coste de almacenamiento diario del producto = (coste de almacenamiento anual × valor del producto)/365
= (0,4 × 1.750.000$)/365
= 1,92$

Puesto que el coste de ahorrarse un día es de 20 dólares, que es muy superior al coste de almacenamiento diario de 1,92 dolares, optamos por la compañía más barata y tardamos un día más en hacer el envío. Esto ahorra 18,08 dólares (20 – 1,92).

Nota: la solución sería radicalmente distinta si el retraso de un día en llevar los conectores a Singapur retrasa la entrega (enfurece al consumidor) o retrasa el pago del producto final de 150.000 dólares. (Los intereses de un día sobre 150.000 dólares o un consumidor enfurecido hacen que el ahorro de 18,08 dólares sea insignificante).

[9] El coste de un consumidor descontento puede equipararse con el coste de quedarse sin existencias que se analiza en el Capítulo 2 sobre “gestión de inventarios”.

ción y el creciente uso de entregas justo a tiempo, las fronteras y puertos estadounidenses están atiborrados. Unos 12 millones de contenedores entran por los puertos estadounidenses todos los años, junto con miles de aviones, automóviles y camiones todos los días. Incluso en las mejores condiciones posibles, aproximadamente el 5 por ciento de los contenedores en movimiento se envían a direcciones equivocadas, se roban, se dañan o se retrasan excesivamente.

Desde el 11 de septiembre de 2001, con los atentados terroristas, las cadenas de suministros se han vuelto más complejas y se puede esperar que lo hagan aún más. Sin embargo, las innovaciones tecnológicas en la cadena de suministros están mejorando la logística, la seguridad y las entregas justo a tiempo. La tecnología puede ahora saber la localización, el contenido y las condiciones de un camión y de un contenedor. Hay nuevos dispositivos que pueden detectar si alguien ha entrado en un contenedor cerrado herméticamente, y pueden comunicar esta información al emisor o al receptor vía satélite o radio. También se pueden instalar detectores de movimiento dentro de los contenedores. Otros sensores pueden registrar los datos del interior del contenedor, tales como temperatura, choques, radiactividad y si se está moviendo el contenedor. El seguimiento de los contenedores perdidos, la identificación de las demoras o, sencillamente, recordar a los individuos de la cadena de suministros que hay un envío en camino, ayudarán a conseguir envíos expeditos. Las mejoras en la seguridad pueden ayudar a las entregas justo a tiempo, y las mejoras en las entregas justo a tiempo pueden ayudar a la seguridad, y ambas cosas pueden mejorar la logística de la cadena de suministros.

BENCHMARKING EN LA DIRECCIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTROS

Como muestra la Tabla 1.6, las relaciones entre los componentes de una cadena de suministros bien dirigida se traducen en benchmarks de clase mundial establecidos por las empresas. Las empresas de referencia (benchmark) han reducido los costes, los plazos de entrega, las entregas con retraso y los desabastecimientos, al mismo tiempo que han mejorado la calidad. La gestión eficaz de una cadena de suministros proporciona una ventaja competitiva al ayudar a las empresas en su respuesta al exigente mercado global del mercado. Wal-Mart, por ejemplo, ha desarrollado una ventaja competitiva mediante la dirección eficaz de la cadena de suministros. Con su propia flota de 2.000 camiones, 19 centros de distribución y un sistema de comunicación vía satélite, Wal-Mart (con la ayuda de sus

Para la mayoría de las empresas, el porcentaje de ingresos gastado en mano de obra está disminuyendo, mientras que el porcentaje empleado en cadena de suministros está aumentando.

TABLA 1.6 ■ Comparación del rendimiento de la cadena de suministros

	Empresas típicas	Empresas de referencia (Benchmark)
Costes administrativos como porcentaje de las compras	3,3%	0,8%
Plazo (semanas)	15	8
Tiempo empleado en hacer un pedido	42 minutos	15 minutos
Porcentaje de entregas con retraso	33%	2%
Porcentaje de material rechazado	1,5%	0,0001%
Número de desabastecimientos al año	400	4

Fuente: Adaptado de un informe de McKinsey & Company.

proveedores) repone los estantes de sus tiendas con una media de dos veces por semana. Los competidores reponen cada semana. Un reabastecimiento rápido y económico significa altos niveles de disponibilidad de producto y reducciones de la inversión en inventario.

RESUMEN

Una parte importante del coste y de la calidad de los productos de muchas empresas, incluyendo la mayoría de las empresas manufactureras, restaurantes, mayoristas y minoristas, viene determinada por una gestión eficaz de la cadena de suministros. La dirección de la cadena de suministros proporciona a las empresas una gran oportunidad para desarrollar una ventaja competitiva, utilizando, a menudo, el comercio electrónico. La dirección de la cadena de suministros es un enfoque para trabajar con los proveedores que incluye no sólo las compras sino también una aproximación integral para crear el máximo valor desde la cadena de suministros. Se conocen cinco estrategias de cadena de suministro. Éstas son: (1) de muchos proveedores, (2) de pocos proveedores, (3) de integración vertical, (4) de redes *keiretsu* y (5) empresas virtuales. Las empresas líderes determinan la estrategia correcta de cadena de suministro, y a menudo desarrollan una organización de gestión logística para asegurar un almacenaje y distribución eficaces.

TÉRMINOS CLAVE

Dirección de la cadena de suministros *(p. 3)*
Decisión de producir o comprar *(p. 8)*
Externalización *(Outsourcing) (p. 8)*
Integración vertical *(p. 12)*
Keiretsu (p. 13)
Empresas virtuales *(p. 14)*
Efecto látigo (*Bullwhip*) *(p. 16)*
Información de arrastre (*Pull*) *(p. 17)*
Control de reabastecimiento en una única etapa *(p. 17)*
Inventario gestionado por el proveedor *(p. 18)*
Aplazamiento *(p. 18)*
Canal de montaje *(p. 19)*
Drop shipping (tramitación de pedidos virtuales) *(p. 19)*
Pedidos abiertos *(p. 19)*
Estandarización *(p. 19)*
Intercambio de datos electrónicos (EDI) *(p. 19)*
Aviso anticipado de expedición (ASN: *Advanced Shipping Notice*) *(p. 19)*
Compras por Internet (*e-procurement*) *(p. 20)*
Selección del proveedor *(p. 21)*
Estrategias de negociación *(p. 23)*
Gestión logística *(p. 24)*

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestra página web o utilice el CD-ROM del estudiante para obtener ayuda sobre este capítulo.


En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas prácticos
- Visita virtual a una empresa
- Problemas para resolver con Internet
- Caso de estudio en Internet

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas prácticos
- Videoclip y caso de estudio en vídeo



CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. Defina la gestión de la cadena de suministros.
2. ¿Cuáles son los objetivos de la gestión de la cadena de suministros?
3. ¿Cuál es el objetivo de la gestión de la logística?
4. ¿Qué diferencia hay entre gestión de la cadena de suministros, compras y gestión de la logística?
5. ¿Qué es la integración vertical? Ponga un ejemplo de integración hacia delante y hacia atrás.
6. ¿Cuáles son los tres enfoques básicos de la negociación?
7. ¿Cómo cambia la relación tradicional de adversarios con los proveedores cuando una empresa toma la decisión de aplicar un sistema con pocos proveedores?
8. ¿Cuál es la diferencia entre aplazamiento y canal de montaje?
9. ¿Cómo utiliza Wal-Mart el drop shipping?
10. ¿Qué son los pedidos abiertos? ¿En qué se diferencian de las compras sin factura?
11. ¿Qué puede hacer el departamento de compras para implementar entregas justo a tiempo?
12. ¿Qué son las compras electrónicas?
13. Brasil y Colombia tienen una fuerte presencia de sindicatos. ¿Cuál es el impacto sobre los sindicatos en el enfoque de producción de VW descrita en el recuadro de apertura *Perfil de una empresa global*?
14. ¿Cuáles son los obstáculos culturales para establecer redes *keiretsu* en países distintos a Japón?



DILEMA ÉTICO

Durante generaciones, la política de Sears Roebuck & Company, el abuelo de los minoristas, fue no comprar más del 50 por ciento de la producción de cualquiera de sus proveedores. El razonamiento subyacente era que esta política permitía a Sears pasar a otros proveedores, según dictase el mercado, sin destruir la capacidad del proveedor de seguir en activo. Por el contrario, Wal-Mart compra una proporción cada vez mayor de la producción de sus proveedores. Con el tiempo, se puede esperar que Wal-Mart se siente a hablar con ese proveedor y le explique que ya no necesita disponer de vendedores y que debe eliminar su plantilla de vendedores y trasladar los ahorros de costes a Wal-Mart.

Sears está perdiendo cuota de mercado, ha sido comprada por K-Mart y está recortando puestos de trabajo; Wal-Mart está ganando cuota de mercado y contratando. ¿Cuáles son los problemas éticos y cuál de estas empresas tiene una postura más ética?



PROBLEMAS

1.1. Elija un establecimiento local que forme parte de una cadena relativamente grande. A partir de entrevistas con los trabajadores y de información en Internet, identifique los elementos de la cadena de suministros. Determine si la cadena de suministros corresponde a una estrategia de bajo coste, de respuesta rápida o de diferenciación (*véase* el Capítulo 2 del volumen *Decisiones Estratégicas*). ¿Son las características de la cadena de suministros significativamente distintas de un producto a otro?

1.2. Como director de compras de Woolsey Enterprises en Golden, Colorado, le pide a su comprador que clasifique como "excelentes", "buenas", "justas" o "deficientes" un conjunto de características para dos potenciales proveedores. Usted sugiere que "Productos" tenga

una ponderación del 40 por ciento, y que las otras tres categorías se ponderen con el 20 por ciento cada una. El comprador le entrega la siguiente clasificación de los proveedores.

CLASIFICACIÓN DEL PROVEEDOR

Empresa	Excelente (4)	Bien (3)	Justo (2)	Deficiente (1)
Fortaleza financiera			K	D
Gama de productos			KD	
Instalaciones de investigación	K		D	
Ubicaciones geográficas		K	D	
Dirección		K	D	
Relaciones laborales			K	D
Relaciones comerciales			KD	
Servicio				
Entregas a tiempo		KD		
Gestión de reclamaciones		KD		
Asistencia técnica		K	D	

Productos	Excelente (4)	Bien (3)	Justo (2)	Deficiente (1)
Calidad	KD			
Precio			KD	
Embalaje			KD	
Personal de ventas				
Conocimiento del producto			D	K
Llamadas de venta			K	D
Servicio de venta		K	D	

DONNA INC. = D
KAY CORP. = K

¿Cuál de los dos proveedores seleccionaría?

1.3. Utilizando los datos del problema 1.2, suponga que tanto Donna Inc. como Kay Corp. han sido capaces de que todas sus valoraciones de "deficiente" pasen a "justo". ¿Cómo clasificaría en ese caso a las dos empresas?

1.4. Desarrolle un formulario de valoración de proveedores que represente su comparación de la formación académica ofrecida por dos universidades en las que pensó (o esté pensando) en matricularse. Incorpore los datos necesarios e identifique la "mejor" alternativa. ¿Está haciendo sus estudios en la "mejor" alternativa? En caso negativo, ¿por qué no?

1.5. Utilizando fuentes de Internet, identifique algunos de los problemas que haya tenido que afrontar una empresa de su elección en su paso a, u operando como, organización virtual. ¿El funcionamiento como organización virtual simplemente agrava viejos problemas, o crea otros nuevos?

1.6. Utilizando la Tabla 1.3, determine las ventas necesarias para poder igualar a un dólar de ahorros en compras para una empresa que tiene:

a) Un beneficio neto del 4 por ciento y que gasta el 40 por ciento de sus ingresos en compras.
b) Un beneficio neto del 6 por ciento y que gasta el 80 por ciento de sus ingresos en compras.

1.7. Utilizando la Tabla 1.3, determine las ventas necesarias para poder igualar a un dólar de ahorros en compras para una empresa que tiene:

a) Un beneficio neto del 6 por ciento y que gasta el 60 por ciento de sus ingresos en compras.
b) Un beneficio neto del 8 por ciento y que gasta el 80 por ciento de sus ingresos en compras.

• **1.8.** Sus opciones para enviar componentes de una máquina, valorados en 100.000 dólares, desde Baltimore hasta Kuala Lumpur, Malasia, son (a) un barco que tardará 30 días a un coste de 3.800 dólares, o (b) enviar por camión los componentes a Los Ángeles y después enviarlos por barco a un coste total de 4.800 dólares. La segunda opción sólo tarda 20 días. Se le paga mediante una carta de crédito el día que llegan los componentes. Se estima que sus costes de almacenamiento ascienden al 30 por ciento del valor por año.

a) ¿Qué opción es más económica?
b) ¿Qué aspectos relativos al cliente no están incluidos en los datos presentados?

• **1.9.** Si tuviera una tercera opción para el problema anterior, que sólo costara 4.000 dólares y también tarda 20 días, ¿cuál es su plan más económico?

• **1.10.** Monczka-Trent Shipping es el proveedor de logística de Handfield Manufacturing Co. en Ohio. Handfield tiene envíos diarios de una bomba de dirección asistida desde su planta de Ohio a una línea de montaje de automóviles en Alabama. El valor del envío normal es de 250.000 dólares. Monczka-Trent Shipping tiene dos opciones: (1) el envío normal de dos días o (2) un subcontratista con dos conductores que conducirán durante toda la noche con una entrega efectiva de un día. El conductor adicional cuesta 175 dólares. Los costes de almacenamiento de Handfield son del 35 por ciento anuales para este tipo de productos.

c) ¿Qué opción es más económica?
d) ¿Qué aspectos relativos a la producción no están incluidos en los datos presentados?



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

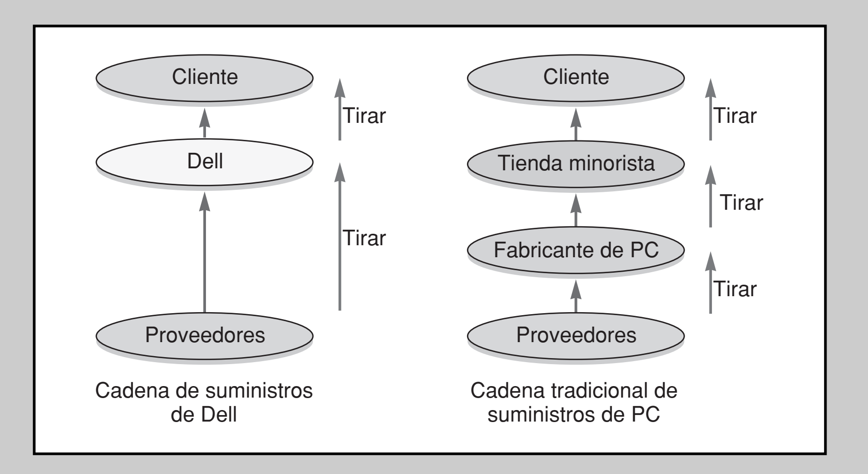
Visite nuestro sitio web en **www.prenhall.com/heizer** para el problema adicional 1.1.

■ *Caso de estudio* ■

La cadena de suministros de Dell y el impacto del comercio electrónico (E-Commerce)

Dell, el fabricante de computadoras personales que se presentó en el recuadro de *perfil de una empresa global* del Capítulo 7 del volumen *Decisiones Estratégicas*, lleva mucho tiempo recurriendo a Internet y al comercio electrónico en su cadena de suministros. La figura de este caso de estudio muestra el excepcional modelo de comercio electrónico de Dell.

Dell vende un gran volumen de productos de bajo coste directamente a los usuarios finales. El montaje se inicia de inmediato tras recibir el pedido del cliente. Los fabricantes tradicionales de PC, por el contrario, han ensamblado los PC previamente, preparándolos para comprarlos en las tiendas minoristas. Dell utiliza la venta directa, fundamentalmente a través de Internet, para aumentar sus ingresos ofreciendo una variedad prácticamente ilimitada de configuraciones posibles de PC. Los clientes pueden elegir configuraciones recomendadas o personalizarlas. La personalización permite que Dell satisfaga a los clientes ofreciéndoles un producto que se acerca a sus requisitos específicos. Las opciones se muestran fácilmente en Internet y permiten a Dell atraer a clientes que valoran esta elección. Dell también utiliza páginas web personalizadas para permitir a las grandes empresas compradoras hacer un seguimiento de sus compras anteriores y hacer pedidos que se



corresponden con sus necesidades actuales. Además, Dell construye páginas web especiales para los proveedores, permitiéndoles ver los pedidos existentes para los componentes que ellos fabrican así como los actuales niveles de inventario en Dell. Esto permite que los proveedores planifiquen en función de la demanda de los clientes y, como resultado, se reduce el efecto látigo.

Los productos de la industria de los PC tienen ciclos de vida de tan sólo unos pocos meses. Pero los PC de los distintos fabricantes son altamente sustituibles porque, a menudo, tienen los mismos componentes. Así pues, una empresa como Dell, que lleva los productos al mercado más deprisa que la competencia, posee una enorme ventaja al ser el primero en llegar al mercado. Las empresas competidoras que venden a través de distribuidores y minoristas tienen que llenar los estantes de los minoristas antes de que un producto llegue al cliente. En cambio, Dell lanza un nuevo producto a los clientes a través de Internet en cuanto el primer PC de ese modelo está listo.

Al utilizar las ventas directas (por teléfono o Internet) para vender los PC, Dell puede eliminar los márgenes de distribuidores y minoristas y aumentar su propio margen. El modelo de ventas directas permite a los clientes de Dell hacer pedidos a cualquier hora del día desde cualquier parte del mundo y es mucho más económico; las tiendas minoristas tienen una mayor cantidad de costes adicionales debido a su modelo de tiendas de ladrillo y cemento. Las ventas directas permiten a Dell cobrar el pago de sus PC en cuestión de días tras su venta. Sin embargo, Dell paga a sus proveedores siguiendo plazos más convencionales. Dados sus reducidos niveles de inventario, Dell puede gestionar su negocio con un capital circulante negativo porque consigue cobrar sus PC con una media de cinco días antes de que pague a sus proveedores por los componentes. Para una cadena de suministros de PC tradicional que incluye a distribuidores y minoristas, es casi imposible conseguir estos resultados.

El proceso de los pedidos, los productos y las líneas de montaje de Dell están diseñados de manera que todos los componentes que forman parte de la personalización que se ofrece a los clientes, se puedan montar en cuestión de horas. Esto permite a Dell posponer el montaje hasta después de que el cliente haya hecho su pedido. Por ello, Dell organiza los inventarios en forma de componentes que son comunes para una amplia gama de productos acabados. El aplazamiento, la modularidad de componentes y una programación ajustada permiten un inventario reducido y respaldan la personalización en masa. Dell maximiza los beneficios del aplazamiento centrándose en nuevos modelos de PC para los que resulta difícil estimar la demanda.

Para los fabricantes de PC que venden a través de distribuidores y minoristas es casi imposible el aplazamiento. Por tanto, los fabricantes tradicionales de PC a menudo están atrapados con configuraciones de PC que no se están vendiendo al mismo tiempo que no tienen las configuraciones que se *están* vendiendo. Por el contrario, Dell está más capacitada para igualar la oferta a la demanda.

Sin embargo, el modelo de comercio electrónico de Dell genera unos costes de envíos mayores que a través de distribuidores y minoristas. Dell envía PC desde sus fábricas individualmente a los clientes. Puesto que estos envíos son pequeños (a menudo uno o

unos pocos PC), los fabricantes que venden a través de distribuidores y de minoristas hacen envíos con ciertas economías de escala, utilizando grandes camiones para hacer envíos a los almacenes y a los minoristas, siendo el usuario final el que proporciona la última parte de la entrega. Los costes de transporte hacia afuera de la cadena de suministros de Dell son mayores, pero, en relación con el precio de un PC, el coste de transporte es relativamente bajo (normalmente del 2 al 3 por ciento) y, por tanto, la repercusión sobre el coste total es reducida.

Preguntas para el debate

1. Aunque puede parecer que Dell, con su modelo de montaje bajo pedido, está mejor equipada para beneficiarse del comercio electrónico, un fabricante tradicional de PC, que vende a través de distribuidores y minoristas, también puede ganar mucho con el comercio electrónico. ¿Por qué?
2. ¿Cómo ha explotado Dell la ventaja de Internet para mejorar su rendimiento?
3. ¿Cuál es la principal desventaja de la venta de PC a través de Internet para Dell?
4. ¿Cómo compite Dell con un minorista que ya tiene un PC en su stock?
5. ¿Cómo trata la cadena de suministros de Dell el problema del efecto látigo?

Fuentes: Adaptado de "Dell Branches Out", *Information Week* (26 de agosto de 2002): 8-20, *Supply Chain Management*, S. Chopra y P. Meindl (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004); y A. A. Thompson y J. E. Gamble, "Dell Computer Corporation: Strategy and Challenges for the 21st Century", *Cases in Strategic Management*, 12.ª edición (Nueva York: McGraw-Hill, 2001).



Caso de estudio en vídeo

La cadena de suministros del Hospital Arnold Palmer

El Hospital Arnold Palmer, uno de los mejores hospitales de Estados Unidos dedicado a atender a mujeres y niños, es una gran empresa con más de 2.000 empleados que trabajan en una instalación con 431 camas que ocupa más de 60.000 metros cuadrados en Orlando, Florida. Como otros muchos hospitales, y otras empresas, el Hospital Arnold Palmer lleva mucho tiempo formando parte de un gran grupo de compras que atiende a 900 miembros. Pero el grupo tenía unas cuantas limitaciones. Por ejemplo, podía cambiar de proveedores para un determinado producto cada año (basado en un nuevo proveedor de menor coste) u ofrecer sólo un tipo de producto con el que no están familiarizados los médicos del hospital. El grupo de compras tampoco era capaz de negociar contratos con fabricantes locales para lograr el mejor precio.

Así pues, en 2003, el Hospital Arnold Palmer, junto con otros siete hospitales asociados de Florida central, formaron su propio grupo de compras, mucho más pequeño, pero todavía poderoso (con unas compras anuales de 200 millones de dólares), la corporación Healthcare Purchasing Alliance (HPA). La nueva alianza ahorró a sus miembros 7 millones de dólares en el primer año a partir de dos cambios principales. En primer lugar, se estructuró y se contrató a personal de forma que se garantizara que la mayor parte de los ahorros derivados de sus esfuerzos de contratación fueran a parar a sus ocho miembros. En segundo lugar, llegó a acuerdos todavía mejores con sus proveedores garantizando un volumen *comprometido* y firmando contratos, no a un año, sino a tres y cinco años. "Incluso con un nuevo coste interno de 400.000 dólares de funcionamiento de la HPA, los ahorros y la capacidad de contratar lo que realmente quieren nuestros hospitales miembros hacen que el sistema sea un auténtico triunfo", comenta George DeLong, director de la HPA.

Una gestión eficaz de la cadena de suministros en las manufacturas suele centrarse en el desarrollo de innovaciones de nuevos productos y en la eficiencia a través de la colaboración entre el comprador y el vendedor. Sin embargo, el enfoque en la industria de servicios tiene un énfasis ligeramente distinto. En el Hospital Arnold Palmer, las oportunidades en la cadena de suministros suelen manifestarse en el Comité Médico

de Resultados Económicos (Medical Economic Outcomes Committee). Este comité (y sus subcomités) está compuesto de los usuarios (incluyendo a médicos y enfermeras) que evalúan las opciones de compra con el objetivo de ofrecer un mejor servicio médico a la vez que se alcanzan objetivos económicos. Por ejemplo, la negociación del marcapasos por parte del subcomité de cardiología permitió la estandarización de dos fabricantes, con unos ahorros anuales de 2 millones de dólares tan sólo en este producto.

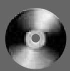
El Hospital Arnold Palmer también es capaz de desarrollar productos personalizados que requieren la colaboración hasta el tercer nivel de la cadena de suministros. Éste es el caso de los packs personalizados que se utilizan en el quirófano. Los packs personalizados son entregados por un distribuidor, McKesson General Medical, pero han sido montados anteriormente por una empresa de packs que utiliza los materiales que el hospital quería, comprados a determinados fabricantes. La HPA permite al Hospital Arnold Palmer ser creativo en este aspecto. Con importantes ahorros de costes, estandarización, pedidos de compras abiertos, contratos a largo plazo, y más control del desarrollo de productos, los beneficios para el hospital son considerables.

Preguntas para el debate*

1. ¿En qué difiere esta cadena de suministros de la de una empresa manufacturera?
2. ¿Cuáles son las restricciones en tomar decisiones basadas sólo en aspectos económicos en el Hospital Arnold Palmer?
3. ¿Qué papel desempeñan los médicos y las enfermeras en las decisiones de la cadena de suministros en un hospital? ¿Cómo se aborda su participación en el Hospital Arnold Palmer?
4. La doctora Smith acaba de volver de la Conferencia Anual de Ortopedas donde asistió a la demostración de una nueva prótesis de cadera. Ha decidido empezar a utilizar esta prótesis de cadera en el Hospital Arnold Palmer. ¿Qué proceso tendrá que seguir en el hospital para introducir este nuevo producto en la cadena de suministros para su futuro uso quirúrgico?

* Puede que quiera ver este caso en su CD-ROM antes de responder a las preguntas.

Fuente: Redactado por los profesores Barry Render (Rollins College), Jay Heizer (Texas Lutheran University) y Beverly Amer (Northern Arizona State University).



Caso de estudio en vídeo

La dirección de la cadena de suministros en Regal Marine

Como muchos fabricantes, Regal Marine observa que debe gastar una gran parte de sus ingresos en compras. También se ha dado cuenta de que, cuanto mejor comprenden sus proveedores a sus usuarios finales, mejores son los productos suministrados por aquéllos y mejor es el producto final de Regal. Al ser una de las diez fábricas más grandes de barcos de Estados Unidos, Regal está intentando diferenciar sus productos del amplísimo número de barcos suministrados por otras 300 empresas. Por lo tanto, la empresa de Orlando trabaja en estrecha colaboración con sus proveedores para asegurar innovación, calidad y entregas en plazo.

Regal ha hecho diferentes cosas para disminuir costes, a la vez que aumentaba la calidad, la rapidez de respuesta y la innovación. En primer lugar, trabajando en una relación de asociación con proveedores que van desde proveedores de parabrisas hasta proveedores de controles para el panel de instrumentos, Regal ha conseguido oportunas innovaciones para sus productos a un coste razonable. Los proveedores clave están tan estrechamente unidos a la empresa, que se reúnen con los diseñadores para discutir cambios en los materiales e incorporarlos en los diseños de los nuevos productos.

En segundo lugar, la empresa se ha unido a otros 15 fabricantes de barcos para formar un grupo de compra, que se conoce por el nombre de Asociación Americana de Constructores de Barcos (American Boat Builders Association), para trabajar con los proveedores en la reducción de los costes de las grandes compras. En tercer lugar, Regal está trabajando con una serie de proveedores locales para que suministren directamente material de ferretería (tornillos, arandelas) y hélices a la línea de montaje en un sistema justo a tiempo. Regal ha

llegado a un acuerdo con el proveedor por el que la propiedad del componente no se transfiere hasta que Regal lo utilice. En otros casos, la propiedad se traspasa cuando se entregan los artículos. Este sistema reduce el inventario total y los costes asociados con grandes lotes de entrega.

Por último, Regal trabaja con una agencia de personal de Orlando para que realice el proceso de reclutamiento y selección de los empleados. En todos estos casos, Regal está aplicando enfoques innovadores en la gestión de la cadena de suministros, lo que ayuda a la empresa y, en último término, al usuario final. El recuadro *Perfil de una empresa global* (que abre el Capítulo 5 del volumen *Decisiones Estratégicas*) sobre Regal Marine proporciona más información respecto a las operaciones de Regal.

Preguntas para el debate*

1. ¿Qué otras técnicas podría utilizar Regal para mejorar la gestión de la cadena de suministros?
2. ¿Qué tipo de respuesta pueden esperar los miembros de la cadena de suministros, en respuesta a su "asociación" a la cadena de suministros de Regal?
3. ¿Por qué es importante la gestión de la cadena de suministros para Regal?

* Si lo desea, puede ver este caso en su CD antes de responder a las preguntas.

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Visite nuestra página personal www.prenhall.com/heizer para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Blue and Gray, Inc.:** Esta empresa tiene que analizar si va a producir un componente en la propia empresa o si va a recurrir a un proveedor externo.
- **Factory Enterprises Inc.:** La empresa está analizando las ventajas del concepto de gestión de la cadena de suministros.
- **Thomas Manufacturing Company:** Esta empresa está analizando cambios radicales en sus prácticas de compras/cadena de suministros.

Harvard ha seleccionado estos casos de la Harvard Business School para acompañar este capítulo (textbookcasematch.hbsp.harvard.edu):

- **Gestión de la cadena de suministros en World Co. Ltd.** (#601-072): Ilustra el valor de los tiempos de respuesta y cómo se pueden reducir.
- **Ford Motor Co.: Estrategia de la cadena de suministros** (#699-198): Evalúa si Ford debería "integrarse virtualmente" siguiendo el modelo de Dell Computer.
- **Sport Obermeyer Ltd.** (#695-022): Analiza cómo igualar la oferta a la demanda en productos con una gran incertidumbre de la demanda.
- **Barilla SpA (A)** (#694-046): Permite al alumno analizar cómo puede una empresa implementar un sistema de reabastecimiento continuo.
- **Un cuento de dos distribuidores de componentes electrónicos** (#697-064): Analiza la consolidación y crecimiento de un distribuidor en Internet.



BIBLIOGRAFÍA

Ballou, Ronald H. *Business Logistics Management*, 5.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2004).

Bender, Paul S. "Debunking 5 Supply Chain Myths". *Supply Chain Management Review* 4, n.º 1 (marzo 2000): pp. 52-58.

Boswell, Tim, *et al.* "How Supplier Development Helps Harley-Davidson Go Lean". *Target: Innovation at Work* 20, n.º 1 (primer trimestre 2004): pp. 18-30.

Chen, I. J., y A. Paulraj. "Towards a Theory of Supply Chain Management: The Constructs and Measurements". *Journal*

of Operations Management 22, n.º 2 (abril 2004): pp. 119-150.

Chen, I. J., A. Paulraj, y Augustine A. Lado. "Strategic Purchasing, Supply Management, and Firm Performance". *Journal of Operations Management* 22, n.º 5 (octubre 2004): pp. 505-523.

Chopra, Sunil, y Peter Meindl. *Supply Chain Management*, 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2004).

Cohen, Morris A., Hau L. Lee, y Don Willen. "Saturn's Supply-Chain Innovation: High Value in After-Sales Service". *MIT Sloan Management Review* (verano 2000): pp. 93-101.

Gardner, Dan. "The Impact of Globalization on Supply Chain Management". *APICS—The Performance Advantage* (abril 2004): pp. 30-35.

Handfield, Robert B., *et al.* "Avoid the Pitfalls in Supplier Development". *MIT Sloan Management Review* (invierno 2000): pp. 37-50.

Handfield, Robert B., y Ernest L. Nichols Jr. *Introduction to Supply Chain Management*, 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2003).

Johnston, David A., *et al.* "Effects of Supplier Trust on Performance of Cooperative Supplier Relationships". *Journal of Operations Management* 22, n.º 1 (febrero 2004): pp. 23-38.

Kapuscinski, Roman, *et al.* "Inventory Decisions in Dell's Supply Chain". *Interfaces* 34, n.º 3 (mayo-junio 2004): pp. 191-205.

Kreipl, Stephan, y Michael Pinedo. "Planning and Scheduling in Supply Chains: An Overview of Issues in Practice". *Production and Operations Management* 13, n.º 1 (primavera 2004): pp. 77-92.

McCutcheon, D., y F. I Stuart. "Issues in the Choice of Supplier Alliance Partners". *Journal of Operations Management* 18, n.º 3 (abril 2000): 279-302.

Mishra, B. K., y S. Raghunathan. "Retailer- vs. Vendor-Managed Inventory and Brand Competition". *Management Science* 50, n.º 4 (abril 2004): pp. 445-457.

Novak, Sharon, y Steven D. Eppinger. "Sourcing by Design: Product Complexity and the Supply Chains". *Management Science* 47, n.º 1 (enero 2001): pp. 189-204.

Ross, Anthony D., y Cornelia Droge. "An Analysis of Operations Efficiency in Large-Scale Distribution Systems". *Journal of Operations Management* 21, n.º 6 (enero 2004): pp. 673-688.

Shin, H., D. A. Collier, y D. D. Wilson. "Supply Management Orientation and Supplier/Buyer Performance". *Journal of Operations Management* 18, n.º 3 (abril 2000): pp. 317-334.

Simchi-Levi, David, Philip Kaminsky, y Edith Simchi-Levi. *Designing and Managing the Supply Chain*, 2.ª ed. Boston: Irwin/McGraw-Hill (2003).

Stanley, L. L. y V. R. Singhal. "Service Quality Along the Supply Chain: Implications for Purchasing". *Journal of Operations Management* 19, n.º 3 (mayo 2001): pp. 287-306.

de Treville, Suzanne, Roy D. Shapiro, y Ari-Pekka Hameri. "From Supply Chain to Demand Chain: The Role of Lead-Time Reduction in Improving Demand Chain Performance". *Journal of Operations Management* 21, n.º 6 (enero 2004): pp. 613-627.

Useem, Michael, y Joseph Harder. "Leading Laterally in Company Outsourcing". *MIT Sloan Management Review* 41, n.º 2 (invierno 2000): pp. 25-36.



RECURSOS EN INTERNET

American Supplier Institute (ASI):
http://www.amsup.com

Commerce One:
http://www.commerceone.com

Council of Logistics Management:
http://www.clm1.org/

Erasmus Global Supply Chain Center:
http://www.global-supply-chain.org

Institute for Logistics Management:
http://www.logistics-edu.com/

Institute for Supply Management:
http://www.ws/ismmembership/principlestandards.cfm

Logistics Information on the Web:
http://www2.dsii.com/

Northwestern University Logistics Page:
http://www.kellogg.nwu.edu/faculty/chopra/htm/rahul/consultants.html

Purchasing Magazine's Business Intelligence Center:
http://www.purchasingdata.com

Purchasing Magazine Web Site:
http://www.manufacturing.net/magazine/purchasing/

S U P L E M E N T O

COMERCIO ELECTRÓNICO Y DIRECCIÓN DE OPERACIONES

1

CONTENIDO DEL SUPLEMENTO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando haya completado este suplemento, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Comercio electrónico (E-commerce)
- B2B, B2C, C2C, C2B
- Catálogos online
- Externalización (Outsourcing)
- Compras electrónicas

Describir o explicar:

- Cómo el comercio electrónico está cambiando a la cadena de suministros
- Subastas online
- Intercambios comerciales en Internet
- Seguimiento del inventario
- Almacenes de paso

INTERNET

Internet
Red internacional de computadoras que conectan a personas y organizaciones de todo el mundo.

Internet es un avance revolucionario para gestionar las operaciones de una empresa. Esta red internacional de computadoras conecta a cientos de millones de empresas y personas de todo el mundo. Aunque el impacto de Internet en nuestras vidas sólo está en sus primeros pasos, el impacto en la dirección de operaciones ya es significativo. La tecnología de Internet posibilita la integración de los sistemas de información interna tradicionales además de mejorar la comunicación entre organizaciones. Los sistemas basados en Internet vinculan globalmente las actividades de diseño, fabricación, entrega, ventas y postventa.

Internet ha remodelado la forma en que las empresas proporcionan valor a sus clientes, interactúan con sus proveedores y gestionan a sus empleados. Un beneficio fundamental es la velocidad, con directivos que pueden tomar decisiones con mejor información mucho más rápido que antes[1]. He aquí sólo algunos ejemplos de sus aplicaciones:

En una subasta online desde el Centro de Operaciones de Mercado Global de la empresa, Ariba proporciona apoyo para todo el proceso de aprovisionamiento global, incluyendo software, desarrollo de proveedores, negociaciones competitivas e implementación de ahorros. Las pujas online a través de comercio electrónico permiten obtener mayores ahorros de costes que las compras tradicionales.

- Los clientes que acuden a **www.dell.com** pueden configurar, ver el precio y pedir sistemas informáticos las 24 horas del día, los siete días de la semana. Pueden ver el estado actual de su pedido y la información sobre la entrega, y tienen acceso online a los mismos materiales de soporte técnico utilizados por los equipos de asistencia telefónica de Dell.
- Integrated Technologies Ltd., un fabricante británico de equipos de diagnóstico médico, intercambia con sus clientes en Europa, en tiempo real, modelos de diseño en 3D a través de su sitio de Internet con contraseña. Esta práctica permite a los clientes no sólo revisar los aspectos técnicos de los productos, sino también hacer análisis más sofisticado, como simulaciones de tensiones o flujos a través de una válvula.
- El fabricante multinacional de robótica NSK.RHP ha construido una factoría conectada a la Red (a la que ha denominado "ciberfactoría") en la que todas las máquinas están vinculadas a Internet. Los operarios de las máquinas utilizan el motor de búsqueda en Internet, Microsoft Explorer, para acceder a las informaciones de planta sobre la preparación de las máquinas y los procedimientos operativos, para recibir formación y para dejar mensajes de turno a turno.
- Los restaurantes de comida rápida, como Burger King, están instalando sistemas de seguimiento remoto. A través de Internet, los directivos pueden ahora comprobar el reloj de fichar, revisar las ventas en la caja registradora, o hacer un seguimiento de la temperatura de los frigoríficos (*véase* el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "Internet mantiene al tanto al director de Burger King").

Intranet
Internet de uso exclusivo en el interior de una empresa.

En el mismo sentido, Hallmark utilizan una Internet interna de la empresa, conocida como **intranet**, para ver las imágenes de las tarjetas anteriores más populares, compartir diseños, e incluso enviar nuevas tarjetas a producción. Hallmark está uniendo estos procesos de negocio de forma que nunca se pierda el control hasta que el diseño llegue a fabricación, donde se crea una plancha para las prensas de impresión.

Su uso dentro de la empresa, o la colaboración técnica y transferencia de información hacia o desde el cliente, están haciendo de Internet una potente herramienta de operaciones. Una accesibilidad global pormenorizada a datos/planos de ingeniería, a inventarios y proveedores, a pedidos y a la situación de los mismos, y a los procedimientos y documentación son las nuevas herramientas de la era de Internet.

[1] El potencial de la interfaz Internet/fabricación se examina en los siguientes sitios de Internet: **http://www.isr.umd.edu** y **http://iac.dtic.mil**.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

INTERNET MANTIENE AL TANTO AL DIRECTOR DE BURGER KING

Paul Bobo hace un seguimiento del rendimiento de Burger King en Internet. Con restaurantes de Burger King en Florida y en Georgia, el señor Bobo puede ahora entrar en Internet y ver cómo van las ventas, comprobar las temperaturas de los frigoríficos y congeladores, verificar la temperatura de la freidora, y ver la actividad dentro del restaurante. Con transmisiones electrónicas desde la caja registradora, desde termómetros inalámbricos colocados directamente en los alimentos, y desde sensores en las puertas y equipos mecánicos, la información de los tres restaurantes está al alcance de la yema de sus dedos. Ahora puede tomar decisiones con información incluso si está en casa. El sistema también puede alertar al señor Bobo de cualquier problema que haya a través de una computadora, un localizador, un teléfono móvil, o cualquier otro dispositivo manual como una agenda digital personal (PDA). Miles de franquicias de comida rápida han adoptado la tecnología.

Los restaurantes envían una señal, desde los terminales del punto de venta, que actualiza la información de ventas tras cada transacción. Esto permite a los directivos acceder a datos en tiempo real en cualquier momento del día o de la noche. Se constata rápidamente que un restaurante para coches está sirviendo con lentitud y está reduciendo las ventas, o cualquier cambio en los productos o en el mix de productos que se vende, lo que permite hacer ajustes oportunos para los pedidos entrantes. Si las ventas caen en un determinado día, el directivo puede llamar al restaurante correspondiente y mandar a casa a los empleados excedentes, para ahorrar costes de mano de obra. El software conectado a Internet es lo suficientemente flexible para que la información que se envía a los directivos pueda clasificarse u organizarse a fin de satisfacer las preferencias individuales. Otra funcionalidad es la utilización de webcams, de forma que se puede hacer un seguimiento por vídeo de la actividad en un restaurante. Si un empleado está haciendo los ejercicios de la universidad, en vez de trabajar, o no lleva el uniforme, o está sacando dinero de la caja registradora, la cámara web lo recoge todo.

No sólo son datos en tiempo real, sino que además suprimen la tediosa tarea nocturna de preparar el informe de ventas del restaurante, lo que permite que los directivos tengan más tiempo para centrarse en resolver problemas, trabajar con los empleados y desarrollar un negocio mejor.

Fuentes: The Wall Street Journal (30 de agosto de 2001): B6; Apigent Solutions, Inc. (**www.apigent.com**); y *Franchising World* (julio/agosto de 2001): 14-16.

Internet está resultando un formidable vehículo para la transformación de la dirección de operaciones. La gama de aplicaciones de Internet sólo parece limitada por nuestra imaginación y nuestra creatividad. Esta red de alta velocidad que llega a la mayor parte del planeta está disponible a un coste muy razonable, y su utilización está creciendo cada día, con más de 350 millones de dominios registrados en todo el mundo[2].

¿Son más eficientes las empresas que utilizan Internet? La respuesta es afirmativa, como verá a lo largo de este suplemento.

COMERCIO ELECTRÓNICO

El **comercio electrónico/e-commerce** (o su sinónimo, negocio electrónico/*e-business*) es la utilización de redes de computadoras, fundamentalmente Internet, para comprar y vender bienes y servicios, e intercambiar información. El resultado del comercio electrónico es un amplio abanico de servicios electrónicos rápidos y de bajo coste. Aunque el comercio electrónico implica un trasvase de información entre empresas, la tecnología es igualmente aplicable entre empresas y clientes y, de hecho, entre los propios consumidores. Las aplicaciones empresariales son evidentes en todas las actividades de negocio, desde el

Comercio electrónico
Uso de redes de computadoras, fundamentalmente Internet, para comprar y vender productos, servicios, y para intercambiar información.

[2] Internet Systems Consortium; **www.isc.org/ds**.

seguimiento del comportamiento de los clientes en las funciones de marketing, hasta la colaboración en el diseño del producto en las funciones de producción, pasando por la aceleración de transacciones en las funciones de contabilidad. El antiguo Presidente de IBM, Louis Gerstner, considera que el comercio electrónico es una forma totalmente nueva de hacer negocios y lo describe así: "se trata de tiempos ciclo, de rapidez, de globalización, de productividad mejorada, de llegar a nuevos clientes, y de compartir conocimiento entre instituciones para lograr una ventaja competitiva"[3]. Empecemos con algunas definiciones en el ámbito del comercio electrónico.

Definiciones de comercio electrónico

Dentro de la denominación común comercio electrónico, se utilizan frecuentemente cuatro definiciones. Se basan en el tipo de transacciones que tienen lugar, y son:

"El comercio electrónico no es una aplicación independiente, separada y diferenciada de otros procesos de negocio. Es una nueva forma de hacer negocios".
Information Week

- *Empresa a Empresa (B2B: Business to Business)*. Esto supone que ambas partes de la transacción son empresas, organizaciones sin ánimo de lucro, o gobiernos.
- *Empresa a Cliente (B2C: Business to Consumer)*. Éstas son transacciones de comercio electrónico en las que los compradores son clientes particulares.
- *Cliente a Cliente (C2C: Consumer to Consumer)*. Aquí los clientes se venden cosas directamente unos a otros mediante anuncios electrónicos clasificados o páginas web de subastas.
- *Cliente a Empresa (C2B: Consumer to Business)*. En esta categoría, los particulares venden servicios o bienes a las empresas.

Estos cuatro tipos de transacciones se muestran en la Figura S1.1.

En este suplemento nos centraremos en el comercio de empresa a empresa. El segmento B2B del comercio electrónico ha crecido por encima de un billón de dólares en Estados Unidos y constituye alrededor del 80 por ciento del mercado del comercio electrónico. La tabla S1.1 enumera los tipos de datos que podemos esperar encontrar en las aplicaciones de B2B.

	Empresa	Cliente
Empresa	**B2B** Global Health Care Exchange, Global Net Xchange	**B2C** Amazon, Dell, Netgrocer.com
Cliente	**C2B** Priceline, Travelocity	**C2C** eBay

FIGURA S1.1 ■ Tipos de transacciones de comercio electrónico

[3] E. Turban *et al., Electronic Commerce: A Managerial Perspective* (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000): 5.

TABLA S1.1 ■ Las aplicaciones de empresa a empresa (B2B) ofrecen estos tipos de información

- Producto: dibujos, especificaciones, vídeo o demostraciones simuladas, precios.
- Procesos de producción: capacidades, compromisos, planes de productos.
- Transporte: disponibilidad de transportistas, tiempos de entrega, costes.
- Inventario: seguimiento de inventario, niveles, costes y localización.
- Proveedores: catálogo de productos, historial de calidad, plazos de aprovisionamiento, términos y condiciones.
- Alianzas en la cadena de suministros: contactos clave, misiones y responsabilidades de los socios, planes.
- Proceso y rendimiento de la cadena de suministros: descripciones del proceso, medidas de rendimiento tales como calidad y entrega.
- Competidores: benchmarking, oferta de productos, cuota de mercado.
- Ventas y marketing: introducción de datos de punto de venta (POS), promociones, precios, descuentos.
- Clientes: historial de ventas y previsiones.
- Costes: índices del mercado, resultados de subastas

LA ECONOMÍA DEL COMERCIO ELECTRÓNICO

El comercio electrónico está revolucionando la dirección de operaciones porque reduce los costes de forma muy eficaz. Reduce los costes mejorando las comunicaciones y difundiendo información económicamente valiosa. El nuevo intermediario que reduce los costes de transacción es el proveedor de comercio electrónico. Este intermediario es más barato y rápido que el agente tradicional. El comercio electrónico mejora la eficiencia económica emparejando compradores y vendedores. Facilita el intercambio de información, de bienes y de servicios. Estas eficiencias añadidas reducen los costes para todo el mundo; también reducen las barreras de entrada. El comercio electrónico permite acceder, tanto a las organizaciones grandes como a las pequeñas, a economías que no eran accesibles anteriormente. La información perfecta es una gran contribución a la eficiencia, y el comercio electrónico nos está acercando un poco más a lo que los economistas llaman *mercados perfectos*.

Además, las restricciones de tiempo inherentes a muchas transacciones comerciales casi desaparecen. La empresa o la persona al otro extremo de la transacción no tienen por qué estar siempre disponible. La comodidad para ambas partes mejora, porque los sistemas de comercio electrónico proporcionan un almacenamiento electrónico de bajo coste. La manera en que comunicamos la información, las transacciones y la creatividad nunca ha sido tan fácil ni barata.

El Grupo de Productos de Consumo de Honeywell, por ejemplo, tenía 28 empleados que tomaban pedidos por teléfono o fax. Cuando 4.000 clientes corporativos pasaron a pedir online, los empleados fueron reasignados a otros puestos de trabajo como ventas externas, con lo que aumentó enormemente la productividad de la mano de obra. Éste es sólo uno de los beneficios del comercio electrónico que se muestran en la Tabla S1.2.

TABLA S1.2 ■ Beneficios y limitaciones del comercio electrónico

Beneficios del comercio electrónico

- Mejor información y a menor coste, que permite que compradores y vendedores estén mejor informados, lo que tiene la capacidad inherente de reducir los costes.
- Un menor coste de acceso mejora el intercambio de información.
- Disponible 24 horas al día, prácticamente en cualquier lugar del mundo, por lo que permite cómodas transacciones para todos los implicados.
- La disponibilidad amplía el mercado, tanto para los compradores como para los vendedores.
- Disminuye el coste de creación, proceso, distribución, almacenamiento y recuperación de información impresa en papel.
- Reduce el coste de la comunicación.
- Comunicación más rica que la tradicional en papel y por teléfono, gracias a los videoclips, voz y demostraciones.
- Entrega rápida de productos digitalizados, como planos, documentos y programas informáticos.
- Mayor flexibilidad para las localizaciones (es decir, permite que algunos procesos estén ubicados en cualquier lugar donde pueda establecerse comunicación electrónica, y que la gente haga sus compras y trabaje desde su casa).

Limitaciones del comercio electrónico

- Falta de seguridad del sistema, de fiabilidad y de estándares.
- Falta de privacidad.
- Algunas transacciones aún siguen siendo bastante lentas.
- Sigue siendo un reto la integración del software de comercio electrónico con los programas informáticos y bases de datos existentes en las empresas.
- Falta de confianza (1) en desconocidos, en la integridad de aquellos que están al otro lado de la transacción, (2) en la integridad de la transacción en sí misma, y (3) en el dinero electrónico que sólo consiste en bits y bytes.

Fuentes: Para debates sobre el tema, *véase* **www.capsresearch.org**; S. Chopra y P. Meindl, *Supply Chain Management,* 2.ª edición (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004).

DISEÑO DEL PRODUCTO

Los ciclos de vida del producto más cortos exigen ciclos de desarrollo del mismo más rápidos y llevan a una competencia basada en el tiempo (tema que tratamos en el Capítulo 5 del volumen *Decisiones Estratégicas*). El comercio electrónico está acelerando aún más la competencia basada en el tiempo. Sin embargo, el director de operaciones se está dando cuenta de que la colaboración e-commerce en el diseño del proceso y del producto por parte de equipos virtuales puede no sólo ser más barato, sino también proporcionar mejores y más rápidas decisiones. Los miembros de los equipos de producto en diferentes localizaciones pueden compartir ahora conocimientos fácilmente y a bajo coste. Por ejemplo, en General Electric, ingenieros en 100 países distintos comparten ahora ideas e información, y trabajan en proyectos de forma simultánea. Basándose en 600 proyectos realizados hasta la fecha utilizando la Red, GE estima que el tiempo necesario para desarrollar un nuevo producto se ha reducido en un 20 por ciento.

Los directores de operaciones también están resolviendo los problemas derivados de esta aceleración mediante la gestión de datos de productos por Internet. Nuevas herramien-

tas de comunicación y de colaboración permiten que los cambios de ingeniería y la gestión de la configuración se extiendan rápidamente por la cadena de suministros. La exactitud de los datos para proveedores, subcontratistas y socios estratégicos adquiere mayor importancia con la globalización y la ampliación de las cadenas de suministros. La complejidad de gestionar el desarrollo de los productos y su definición aumenta a medida que las responsabilidades de diseño se traspasan de un equipo central a equipos de desarrollo de producto diseminados por todo el mundo. El comercio electrónico, con la veloz transferencia de especificaciones, de imágenes tridimensionales y colaboración rápida, facilita la tarea.

Por ejemplo, General Motors está relacionando a miles de proveedores a través de su red electrónica de ingeniería y diseño. La red por Internet permitirá a los proveedores de GM trabajar online en tiempo real con los diseñadores, creando y editando modelos CAD en 3D. Antes, los proveedores trabajaban a partir de planos de diseño "estáticos" y esquemas de ingeniería y tenían que esperar a que llegasen las actualizaciones impresas en papel. Ahora reciben actualizaciones online para diseños online.

Dirección de proyectos en colaboración

La utilización de Internet para acelerar la colaboración en el diseño de productos también ha sido extendida a la dirección de proyectos (tema que se aborda en el Capítulo 3 del volumen *Decisiones Estratégicas*), por las oportunidades de compartir información que proporciona la Red. El software Microsoft Project permite a los usuarios crear un sitio web intranet en el que pueden compartir documentos, mantener la situación del proyecto y poner notas. Livelink, un programa para utilización en grupo, permite la creación de una biblioteca de gestión de documentos en la intranet.

COMPRAS ELECTRÓNICAS (*E-PROCUREMENT*)

El aprovisionamiento moderno es a menudo electrónico. Como vimos en el Capítulo 1, las **compras electrónicas** consisten en comprar o emitir pedidos a través Internet o mediante catálogos electrónicos certificados por el proveedor.

Compras electrónicas
Compras y lanzamiento de pedidos comunicados por Internet o por catálogos online aprobados por el proveedor.

Catálogos online

Los **catálogos online** son información sobre productos en formato electrónico a través de Internet. Están mejorando rápidamente los procesos de comparación de costes y de puja. Estos catálogos online pueden enriquecer los catálogos tradicionales mediante la incorporación de voz y videoclips, como ocurre con el CD-ROM que acompaña a este texto. Los catálogos online están disponibles en tres versiones: (1) los proporcionados por los proveedores, (2) los desarrollados por intermediarios, y (3) los que proporcionan los compradores. Pasamos a comentar cada uno de ellos.

Catálogo online
Presentación electrónica (por Internet) de los productos, que eran presentados tradicionalmente en catálogos impresos.

Catálogos online proporcionados por el proveedor Entre los catálogos proporcionados por los proveedores está el de W. W. Grainger (**www.Grainger.com**), que es probablemente el mayor vendedor del mundo de artículos MRO (mantenimiento, reparaciones y operaciones). Grainger tenía que ocuparse de frecuentes compras, relativamente baratas, de compradores que buscaban formas muy específicas de satisfacer sus necesidades. En vez de plantear su página web como una típica línea gratuita, Grainger replanteó su modelo de negocio y puso su catálogo de 4.000 páginas en la Red. El catálogo online está integrado en el sistema de ventas y servicio de la empresa, es fácil de usar y proporciona mucha información sobre los precios y productos disponibles. Las versiones personalizadas reflejan los descuentos aplicables a cada cliente. Además, el sistema recoge pedidos

24 horas al día en lugar de limitarse a las horas de apertura de las tiendas Grainger. Estos catálogos sólo ofrecen ventajas, son de ganar/ganar, para el director de operaciones (el cliente) y para Grainger. El personal de operaciones encuentra que el catálogo online es más fácil de usar y está disponible siempre que lo necesitan. Además, el tamaño del pedido medio ha aumentado casi un 50 por ciento.

Los catálogos online suelen estar disponibles en el PC de sobremesa de cada uno de los empleados. Una vez aprobado y creado el catálogo, cada empleado puede hacer sus propias compras. En muchas industrias de procesos, los artículos de mantenimiento, reparaciones y operaciones representan una parte sustancial de las ventas en dólares. Muchas de estas compras representan individualmente un importe en dólares relativamente bajo, y por ello no logran recibir la atención de otras compras "normales". El resultado es una enorme ineficiencia. El comercio electrónico online proporciona la oportunidad de lograr importantes ahorros; además, el seguimiento de los pedidos es menos caro en soporte electrónico que en papel. Los directores de operaciones consiguen comodidad a la vez que se reducen los costes del departamento de compras.

"... las compras electrónicas... integran las cadenas de suministros entre distintos compradores y vendedores, y hacen que la cadena de suministros de una empresa se configure como una ventaja competitiva clave".

Robert Derocher,
Deloitte Consulting.

Catálogos online proporcionados por intermediarios Los intermediarios son empresas que gestionan un sitio de Internet donde pueden encontrarse compradores y vendedores. Un caso típico es el de ProcureNet (**www.procurenet.com**). ProcureNet ha combinado 30 sitios de vendedores con más de 100.000 componentes para la industria electrónica. Compradores cualificados pueden hacer sus pedidos a las empresas vendedoras. Boeing Aircraft, por ejemplo, mantiene un sitio de intermediario para sus clientes. En este sitio web, llamado Boeing PART (*Part Analysis and Requirements Tracking:* Análisis de Piezas y Seguimiento de Necesidades), 500 clientes de Boeing pueden mandar sus pedidos de piezas de repuesto, muchas de las cuales se envían directamente desde los proveedores a los clientes (*drop shipping*). El coste es significativamente menor que con el tradicional de faxes, llamadas telefónicas y pedidos de compra.

Catálogos online proporcionados por el comprador Varios megasitios de intercambios comerciales en Internet han cambiado la forma en que las empresas compran prácticamente todo desde clips hasta prensas y mesas. En la Tabla S1.3 se ofrece una lista de estos bazares online.

El primero, GlobalNetXchange (GNX), tiene socios accionistas como Sears y Kroger (ambos estadounidenses), Carrefour y Pinault (ambos franceses), Coles Myer (australiano), Karstadt y Metro (ambos alemanes) y J. Sainsbury (británico). Desde su creación, los centros comerciales de GNX han publicado una reducción del 32 por ciento de inventarios excedentes (sobrantes), una mejora del 25 por ciento en los tiempos de entrega y una reducción del 10 por ciento en los niveles de inventarios. Casi todas las demás industrias han seguido el ejemplo de GNX.

El segundo sitio de intercambios que se muestra en la Tabla S1.3, Global Health Care Exchange, es típico de los demás sitios. Su modelo se muestra en la Figura S1.2. En un hospital tradicional, la cadena de suministros actual (a la izquierda) comienza en el departamento de compras. Estanterías llenas de catálogos, con informaciones y precios que podrían estar obsoletos hace años. Los pedidos se envían por teléfono o por fax a miles de distribuidores y fabricantes. Algunos hospitales y proveedores están unidos electrónicamente, pero estas relaciones electrónicas suelen requerir una intervención manual. Al otro lado de la cadena están los fabricantes o distribuidores de cualquier tipo de cosa, desde válvulas para el corazón hasta papel higiénico. La nueva forma de efectuar el intercambio comercial electrónico, a la derecha, ejercen una presión bajista sobre los precios y mejora la eficiencia de la transacción.

TABLA S1.3 ■ Intercambios comerciales en Internet

Bienes al por menor: creado por Sears y por la francesa Carrefour; llamado GlobalNetXchange para detallistas (**gnx.com**).

Productos de atención sanitaria: creado por Johnson & Johnson, GE Medical Systems, Baxter International, Abbott Laboratories y Medtronic Inc.; llamado Global Health Care Exchange (**ghx.com**).

Productos de defensa y aeroespaciales: creado por Boeing, Raytheon, Lockheed-Martin y BAE Systems de Gran Bretaña; llamado Aerospace and Defense Industry Trading Exchange (**exostar.com**).

Alimentos, bebidas y productos de consumo: creado por 49 empresas líderes de alimentos y bebidas; llamado Transora (**transora.com**).

Acero y productos metálicos: como New View Technologies (**Exchange.e-steel.com**) y Metal-Site (**metalsite.com**).

Hoteles: creado por Marriott y Hyatt, a las que después se unieron Fairmont, Six Continents y Club Corp: llamado AVendra (**avendra.com**) hace compras para 2.800 hoteles.

Las solicitudes de presupuestos (RFQs) y la oferta "empaquetada"

El coste de preparar solicitudes de presupuestos (*Request for Quotes,* RFQs) puede ser importante. Por ello, el comercio electrónico ha encontrado otra área lista para hacer mejoras. General Electric, por ejemplo, ha podido hacer avances importantes en esta faceta de

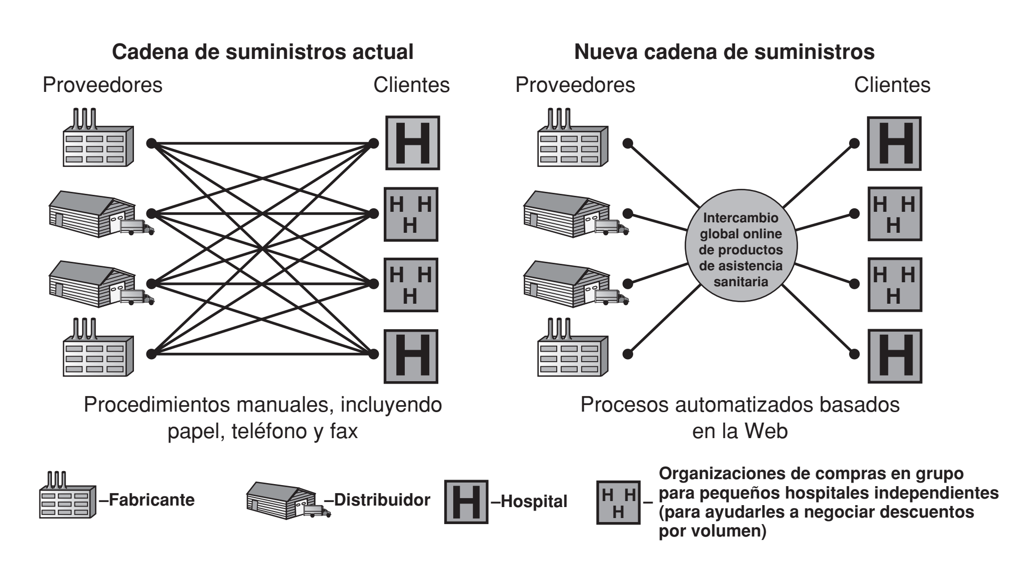


FIGURA S1.2 ■ La cadena de suministros médicos se pasa a online

Se estima que existe un desperdicio de 11.000 millones de dólares en la actual cadena de suministros médicos. Están en marcha esfuerzos de racionalización para hacer más eficientes los sistemas y reducir los costes con intercambios comerciales online.

Fuentes: Adaptado de *The Wall Street Journal* (28 de febrero de 2000): B4; y estudio de la industria de Chase H&Q.

su proceso de compras. El personal de aprovisionamiento tiene ahora acceso a una amplia base de datos sobre proveedores, características de entrega y de calidad. Con este extenso historial, la selección de proveedores para conseguir ofertas ha mejorado. También están disponibles ficheros electrónicos con dibujos y planos de ingeniería. Esta combinación permite a los agentes de compras adjuntar copias electrónicas de los planos necesarios a las solicitudes de presupuesto (RFQs), y mandar el "paquete" completo de forma electrónica y codificada a los suministradores en cuestión de horas, y no de días. El sistema es a la vez más rápido, alrededor de tres semanas, y menos caro.

Externalización a Internet (*Internet Outsourcing*)

Externalización a Internet Transferencia a proveedores en Internet de actividades de una organización que tradicionalmente se desarrollaban internamente.

Las organizaciones creativas están probando la versatilidad de Internet realizando procesos empresariales como gestión de nóminas, contabilidad y servicios de recursos humanos a través de Internet. La **externalización a Internet (*Internet outsourcing*)** transfiere actividades de una organización que han sido tradicionalmente realizadas de forma interna a proveedores en Internet. Las empresas que quieren externalizar su función de recursos humanos, que no es clave para sus operaciones, pueden encontrar organizaciones como Employease (**Employease.com**), que les suministrará el servicio a través de Internet. Otras empresas gestionan las prestaciones sociales de los empleados (**www.OnlineBenefits.com**). Estas empresas, y otras parecidas, realizan algunas o todas las funciones del departamento de recursos humanos interno de cualquier empresa a través de un sitio web. Con diferentes niveles de restricción, los supervisores, los empleados y el personal de recursos humanos tienen acceso a la información adecuada. Otras posibilidades de externalización son los viajes (**TheTrip.com**), gestión de documentos (**CyLex.com**) y envíos (**FedEx.com**).

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

EL MODELO DE COMPRAS ELECTRÓNICAS B2B DE ARIBA

El volumen de compras de los particulares por Internet está creciendo, y sin fin a la vista. Pero en las transacciones B2B es donde está realmente la acción. Bob Calderon, consejero delegado de Ariba, una empresa de comercio electrónico industrial de Sunnyvale, California, dice que las pujas online en directo y unas decisiones de compra con mejor información dan como resultado mayores ahorros de costes que el aprovisionamiento más tradicional. Roger Blumberg, director de suministros de Ariba, señala que los compradores ahorran una media del 20 por ciento mediante las subastas online.

Contemplemos el siguiente caso: United Technologies Corp. necesitaba proveedores para fabricar placas base por valor de 24 millones de dólares. Ariba evaluó a unos 1.000 proveedores potenciales e invitó a 50 de ellos, especialmente cualificados, a presentar ofertas. Se realizó una licitación competitiva en directo durante tres horas. Ariba dividió el trabajo en 12 lotes y puso a subasta cada uno. A las 8:00 horas se puso en la Red el primer lote, valorado en 2,25 millones de dólares. La primera oferta fue de 2,25 millones, que fue vista por todos. Minutos después, otro pujó por 2 millones. Hubo más pujas a la baja. Minutos antes de que la subasta se cerrase para el primer lote, a las 8:45 horas, el que hacía la oferta n.º 42 pujó por 1,1 millones. Cuando todo terminó, las pujas por los 12 lotes ascendían a un total de 18 millones de dólares (alrededor de un 35 por ciento de ahorro para United Technologies).

Luego, Ariba analizó a los postores, propuso a los ganadores y cobró sus honorarios (hasta el 2,5 por ciento de comisión) tanto del comprador como de los proveedores.

Fuentes: Information Week (4 de octubre de 2004): 51; *Converting Magazine* (septiembre de 2004): 28; y *Knight Ridder Tribune Business News* (1 de febrero de 2004): 1.

Subastas online

Los sitios de subastas online también pueden ser gestionados por los vendedores, compradores o intermediarios. El enfoque de General Motors para vender sus excedentes de acero consiste en publicarlo en la Red y esperar a que sus propios proveedores cuando necesiten acero lo compren a GM. Se trata de un precursor de las subastas de empresa a empresa (B2B) que cualquier industria es capaz de hacer. Los directores de operaciones encuentran en las subastas online un terreno abonado para deshacerse de excedentes de materia prima y de inventarios fin de serie o en exceso. Ariba, como se comenta en el recuadro de *Dirección de producción en acción*, mantiene un sitio web de intermediación de subastas. Las subastas online reducen las barreras de acceso y simultáneamente aumentan el número potencial de clientes.

La clave para las empresas de subastas como Ariba es encontrar y crear una enorme base de potenciales postores; en efecto, muchos de los empleados de Ariba dedican su tiempo, no a ejecutar subastas electrónicas, sino a evaluar a nuevos proveedores. Para el director de operaciones, las repercusiones de este enfoque de compra son significativas, y la cadena de suministros exige tener ahora un nuevo conjunto de habilidades.

De nuestros comentarios sobre la cadena de suministros en el Capítulo 1, debe recordar que muchas empresas gastan más de la mitad de sus ventas en compras. Las estimaciones previas del 10 por ciento de ahorros en aprovisionamientos mediante estas opciones de comercio electrónico podrían ser muy conservadoras. Recientemente, el grupo de aviónica de Honeywell ahorró 400.000 dólares, o el 19,5 por ciento, en la compra de 1,7 millones de dólares en componentes. Carrier Corp. ahorró un 16 por ciento en motores de aire acondicionado recurriendo a proveedores asiáticos. Sun Microsystems afirma que ha ahorrado más de mil millones de dólares al año utilizando su propio sistema de subasta inversa (un sistema denominado Pujas Dinámicas): la empresa dedica ahora una hora para fijar el precio de componentes que antes requerían semanas, o meses, de negociación[4].

SEGUIMIENTO DEL INVENTARIO

Los esfuerzos pioneros de FedEx en el seguimiento de los paquetes, desde la recogida hasta la entrega, han marcado el camino para que los directores de operaciones hagan lo mismo con sus envíos e inventarios (*véase* el recuadro de *Perfil de una empresa global* que comenta la red mundial de FedEx en el Capítulo 8 del volumen *Decisiones Estratégicas*). Sin duda, si FedEx puede seguir la pista a millones de documentos día a día por el mundo entero, los directores de operaciones en otras empresas también pueden hacerlo. Las herramientas de comercio electrónico, entre las que se hallan la disciplina de recopilación de datos, la tecnología de códigos de barras, la radiofrecuencia y las comunicaciones electrónicas para tener controlado el inventario en tránsito, en la fábrica y en el almacén, están ahora perfeccionadas y disponibles para el director de operaciones con recursos.

Ford ha contratado a UPS para hacer el seguimiento de los vehículos en su traslado desde la fábrica hasta los concesionarios. El seguimiento de automóviles y camiones ha sido una ciencia ciertamente inexacta durante años. Se espera que el nuevo sistema de seguimiento de Ford controle a más de 4 millones de automóviles y camiones Ford cada año. Mediante la utilización de códigos de barras y de Internet, los concesionarios podrán entrar en el sitio web y averiguar exactamente en qué punto del sistema de distribución se encuentran los vehículos que han encargado. Cuando los directores de operaciones se mueven hacia una era de personalización masiva, con clientes que encargan cada uno exac-

---

[4] G. Verga, "Reverse Auctions", APICS – *The Performance Advantage* (enero de 2002): 28-31.

El comercio electrónico está apoyado por el seguimiento de los envíos mediante códigos de barras. En cada paso del trayecto, desde la recogida inicial hasta el destino final, se leen y almacenan los códigos de barra. En pocos segundos esta información de seguimiento se encuentra disponible online para que puedan verla los clientes en cualquier parte del mundo.

tamente el automóvil que desea, los clientes querrán saber dónde está su automóvil y exactamente cuándo pueden ir a recogerlo. Internet y el comercio electrónico pueden proporcionar este servicio y hacerlo de manera económica.

REDUCCIÓN DEL INVENTARIO

Almacenamiento en el comercio electrónico

El nuevo almacén para el comercio electrónico no lo gestiona el productor, sino el proveedor logístico. Como sugiere el recuadro de *Dirección de producción en acción* titulado "En el comercio electrónico, los 'depósitos de paso' sustituyen a los almacenes", este nuevo almacén más que un almacén es una "instalación de paso". Trabajando con United Parcel Service, Nike, Inc. utiliza una instalación de este tipo en Louisville, Kentucky, para gestionar sus pedidos online. Y el almacén de FedEx junto al aeropuerto de Memphis puede recibir un pedido después del cierre de una tienda por la noche y localizar, empaquetar y mandar la mercancía esa misma noche. La entrega está garantizada antes de las diez de la mañana del día siguiente.

Entregas justo a tiempo en el comercio electrónico

Los sistemas justo a tiempo en fabricación (*véase* el Capítulo 6) están basados en la premisa de que las piezas y materiales serán entregados en el momento necesario (justo a tiempo). El comercio electrónico puede apoyar este objetivo coordinando el sistema de inventario del proveedor con las capacidades del servicio de la empresa de entregas.

FedEx tiene un breve historial, pero lleno de éxitos, en el uso de Internet para hacer el seguimiento online en el mundo del comercio electrónico. En 1996, la empresa lanzó el FedEx InterNetShip, que consiguió 75.000 clientes en 18 meses. Un cliente de **FedEx.com**

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

EN EL COMERCIO ELECTRÓNICO, LOS "DEPÓSITOS DE PASO" SUSTITUYEN A LOS ALMACENES

Los dos edificios ocupan casi 15.000 metros cuadrados (más de 2 campos de fútbol) en la zona sur del aeropuerto de Oregon en Portland. Como respuesta a un enojoso problema en el comercio electrónico, en concreto, entregar realmente las mercancías pedidas, estos "depósitos de paso" (anteriormente llamados almacenes) ayudan a que el producto esté disponible. En la venta minorista mediante el comercio electrónico, la venta de un artículo en la Red es la parte fácil; entregarlo al cliente con rapidez es lo más difícil.

Un depósito de paso no es tanto un lugar para almacenar las mercancías sino más bien un centro concentrador (*hub*) de transporte. Las enormes cintas transportadoras automatizadas y los equipos de almacenamiento están diseñados para acelerar el proceso de entrada y salida de pedidos. Objetivo de corporaciones que mueven grandes volúmenes y entregas rápidas, sus clientes incluyen a "integradores" como UPS, Emery, DHL y FedEx, así como agentes de transporte, empresas de logística y compañías aéreas.

Los edificios en una instalación de paso están configurados de forma que a los equipos de carga les resulte fácil maniobrar. Con acceso directo a las pistas de rodadura, cuatro 747 y 68 camiones grandes pueden cargar y descargar al mismo tiempo. "Cuanto más cerca puedas llevar tu producto al centro de carga aérea, más corto será tu tiempo de entrega. La única forma que tiene el comercio electrónico de competir eficazmente con los comerciantes locales es si un cliente puede conectarse, encargar algo y conseguirlo en un día", dice Steven Bradford, vicepresidente de Trammell-Crow, empresa que realiza estas instalaciones.

Fuentes: New York Times (23 de enero de 2000): B3; *Transportation & Distribution* (enero de 2000): 42-52; y *Consulting-Specifying Engineer* (junio de 2000): 30-34.

puede hoy calcular los costes de envío, imprimir etiquetas, gestionar las facturas y hacer el seguimiento del paquete, todo en la misma página web. (FEDEC, por cierto, ahorra 3 dólares por cada solicitud de información que se realiza a través de Internet en vez de por teléfono.) FedEx también tiene una función crucial en los procesos logísticos de otras empresas. En algunos casos, FedEx gestiona el servidor de la página web de algunos detallistas. En otros casos, como el de Dell Computer, gestiona almacenes que recogen, empaquetan, comprueban y ensamblan productos, para luego gestionar las entregas e incluso el control de aduanas. El servicio B2B de FedEx, llamado "pedido virtual", integra los catálogos web de diferentes empresas y los pedidos de los clientes para Dell. FedEx entonces completa los pedidos y los entrega mediante su flota de camiones y aviones. FedEx está demostrando eficazmente que una empresa de servicios e-commerce puede gestionar económicamente complejas transacciones para otras empresas.

MEJORAS LOGÍSTICAS Y DE PROGRAMACIÓN

Recogidas y entregas coordinadas

FedEx mantiene una visión unificada de los datos que radican en diferentes partes de su red, de forma que puede hacer un mejor seguimiento y coordinación de los pedidos para su cliente final. Esto condujo a la empresa al nuevo modelo de recogida y entrega coordinadas. Así es como funciona: Cisco y FedEx establecieron una alianza por la que FedEx recoge y entrega los componentes de Cisco donde se necesiten, cuando se necesiten. E-commerce permite a FedEx saber adónde se dirige cada pieza de los envíos de Cisco y cuándo estará lista para su envío. FedEx entonces entrega exactamente los artículos cuan-

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

LAS SUBASTAS ONLINE DE MARS GANAN EL JUEGO DE LOS ENVÍOS

El gigante de los alimentos Mars Inc. (el fabricante de M&Ms y de Snickers) está utilizando Internet para cambiar las reglas de la logística y del transporte por carretera en Europa. Para la empresa media, la contratación de un camión para trasladar productos acabados o materias primas requiere un teléfono, un bolígrafo, un Rolodex® (un sistema de fichas con datos de contacto) y un tráiler cargado de paciencia. Pero Mars, que tiene una factura por transporte de 250 millones de dólares anuales, en lugar de todo lo anterior, utiliza las subastas online para seleccionar a sus transportistas. El enfoque de Internet ha tenido tanto éxito, que la empresa ha creado una filial con sede en el Reino Unido, Freight Traders, que ha movido miles de millones de dólares de bienes para Mars, Kellogg, Lever, Faberge y otros. Los contratos que solían requerir meses, ahora requieren semanas, y una de las empresas de las que envían está ahorrando casi el 50 por ciento de sus costes de transporte.

Los costes de transporte representan entre el 3 y el 6 por ciento del presupuesto de las más grandes empresas de bienes de consumo. La planificación de los movimientos de los camiones para estas empresas es muy compleja. El transporte de una sola carga de bienes desde Inglaterra hasta Italia puede costar 1.100 dólares, o puede costar 2.300.

El primer paso de Freight Traders consiste en crear una amplia "comunidad" de fabricantes con carga para transportar. Estas empresas se presentan a continuación, en el sitio web de Freight Traders, a una amplia selección de transportistas con camiones que llenar. La subasta online determina quién es el expedidor que gana. Estas subastas permiten a los transportistas asignar sus camiones más eficientemente: "los viajes en vacío" (la vuelta de una entrega con el camión vacío) han disminuido un 20 por ciento. El director ejecutivo de Freight Traders, Garry Mansell, también estima que el ahorro medio para los expedidores está entre el 5 y el 8 por ciento. La empresa sólo tiene a 10 empleados que tratan con más de 1.000 transportistas y 200 expedidores activos en sus subastas.

Fuentes: Fast Company (abril de 2003): 38-39; *Traffic World* (17 de abril de 2000); e *Interfaces* (enero-febrero de 2003): 23-25.

do y donde se necesitan para su montaje e instalación. FedEx junta los pedidos en tránsito. Los componentes nunca van a un almacén. Los ahorros se encuentran en la reducción del inventario en tránsito y en tener los componentes disponibles cuando se necesitan, ni antes ni después. La cantidad de tiempo que los artículos están en el sistema de distribución se reduce, así como la cantidad de artículos en el sistema. Estas técnicas están reduciendo el tiempo de entrega e instalación a la vez que se reducen los costes.

Reducción de costes logísticos

Recientes informaciones indican que la industria del transporte de automóviles ronda una media de utilización de su capacidad de sólo el 50 por ciento. Este espacio desaprovechado cuesta a la economía estadounidense 31.000 millones de dólares al año. Para mejorar la eficiencia de la logística, Schneider National creó una página web (Schneider Connection en **www.schneider.com**) que permite a los que tienen que enviar y a los transportistas ponerse de acuerdo para utilizar algo de esta capacidad desaprovechada. Las empresas que han de enviar mercancías pueden elegir entre cientos de transportistas norteamericanos autorizados que se han apuntado a Schneider Connection. La oportunidad que tienen los directores de operaciones de utilizar la tecnología del comercio electrónico para reducir el coste logístico es importante: esto se muestra más profundamente en el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "Las subastas online de Mars ganan el juego de los envíos".

RESUMEN

El comercio electrónico está revolucionando la forma en que los directores de operaciones logran las mayores eficiencias. La colaboración económica puede mejorar la toma de decisiones y reducir los costes. La reducción de costes puede darse en el proceso de la transacción, la eficiencia en las compras, la reducción de inventario, la programación y la logística. Las posibilidades son impresionantes. Alcanzar la velocidad del comercio electrónico no es opcional. Los más lentos no serán dejados atrás, serán eliminados. El personal de operaciones que utiliza el comercio electrónico para conseguir ventaja competitiva dominará a sus rivales.



Internet *(p. 38)*
Intranet *(p. 38)*
Comercio electrónico (*E-commerce*) *(p. 39)*
Compras electrónicas (*E-procurement*) *(p. 43)*
Catálogo online *(p. 43)*
Externalización a Internet (*Internet outsourcing*) *(p. 46)*

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.

En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Casos de estudio en Internet



- Lección en PowerPoint



CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. Defina el comercio electrónico.
2. Explique las diferencias entre el comercio electrónico *B2B, B2C, C2C* y *C2B*. Ponga un ejemplo de cada uno.
3. ¿Por qué el comercio electrónico es importante en el diseño del producto?
4. Explique cada uno de los tres modelos de catálogos online.
5. ¿Qué valor tienen las subastas online en el comercio electrónico?
6. Explique cómo utiliza FedEx Internet para satisfacer las exigencias de entregas rápidas y precisas.
7. ¿Qué economías se logran con el comercio electrónico?
8. ¿Cuáles son los beneficios del comercio electrónico?
9. Internet está revolucionando la forma en que las empresas hacen negocios. También puede aumentar la utilización de recursos que actualmente están desaprovechados. ¿Cómo puede lograrse? Ofrezca algunos ejemplos.
10. ¿Qué tipos de servicios se están externalizando vía Internet?



PROBLEMAS

: **S1.1.** Utilizando Internet, halle a una empresa de consultoría o de software que ayude a las empresas a gestionar mejor sus cadenas de suministros mediante el comercio electrónico. Prepare un pequeño informe sobre la empresa, incluyendo los beneficios que le proporciona y los nombres de algunos de sus clientes.

: **S1.2.** General Electric Information Services gestiona una comunidad de decenas de miles de socios comerciales. Visite **www.geis.com** y después describa los servicios de intercambio global de GE.

: **S1.3.** Entre en **www.peapod.com** y en **www.netgrocer.com** para ver estas tiendas electrónicas de comestibles. Compare los servicios ofrecidos por estas empresas y recomiende mejoras para cada una.

: **S1.4.** Visite la página web de **www.ariba.com** (descrito en el recuadro sobre *Dirección de producción en acción*). Explique su modelo de comercio electrónico B2B.

: **S1.5.** Utilice Internet para encontrar y explorar el sitio web de L. L. Bean. ¿Qué papel desempeña la logística de entregas en la estrategia de operaciones de la empresa? ¿Tiene la ventaja añadida de ayudar el esfuerzo de marketing de Bean?

: **S1.6.** Internet debería llevar a muchos mercados a ser mercados más abiertos, tal vez con "información perfecta". Una de las características de un mercado perfecto es que toda la información se puede conseguir fácilmente por todos los observadores: competidores y clientes por igual. En estas condiciones, sus proveedores, proveedores potenciales y competidores tendrían un conocimiento considerable sobre sus costes y precios de venta. ¿Cuáles son las consecuencias de este conocimiento sobre su cadena de suministros?

: **S1.7.** Utilice un catálogo online para obtener el precio de una pequeña mesa de despacho. Averigüe sus dimensiones y el precio.

■ *Caso de estudio* ■

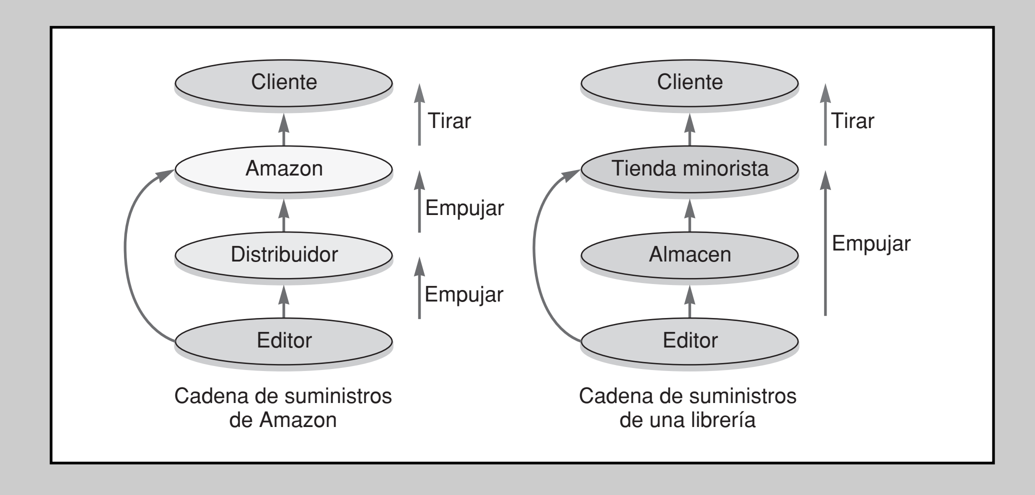
El comercio electrónico en Amazon.com

Amazon empezó siendo un sitio de comercio electrónico de libros y ahora ha incorporado música, juguetes, productos electrónicos, software, equipos para el hogar y otros a su lista de productos ofrecidos. Como se muestra en el gráfico, la cadena de suministros de Amazon es más larga que la de cadenas de librerías como Borders, o Barnes & Noble, debido a la presencia de un intermediario adicional: el distribuidor. Los márgenes del distribuidor en la cadena de suministros de Amazon sugieren un incremento en el coste,

Sin embargo, Amazon ha explotado diferentes posibilidades de Internet para atraer a los clientes y aumentar sus ingresos. Amazon utiliza Internet para atraer a los clientes ofreciendo una gran información sobre millones de libros. Una gran librería física, por el contrario, ofrece menos de 100.000 títulos. Amazon también utiliza Internet para personalizar el servicio a cada individuo. El software de Amazon permite desarrollar y mantener relaciones con los clientes recomendando libros en función del historial de compras del cliente, enviando un recordatorio en épocas de vacaciones, y permitiendo a los clientes revisar y hacer comentarios sobre los libros. Se introducen rápidamente los nuevos títulos, que se ponen a disposición del cliente online, mientras que las cadenas de librerías de "ladrillo y cemento" deben distribuir y almacenar los libros antes de venderlos. Amazon también aprovecha otra de las características de Internet: pedidos online las 24 horas del día, siete días por semana. A esto Amazon suma la entrega en el domicilio del cliente.

Amazon utiliza el comercio electrónico para reducir los costes de inventario y de sus instalaciones, pero aumenta los costes de procesamiento y de transporte. Amazon puede reducir los inventarios consolidándolos en unas pocas localizaciones. Por otra parte, una cadena de librerías debe llevar cada título a cada tienda. Amazon tiene en inventario los libros que se venden mucho, pero los libros que se venden poco los compra a distribuidores en función de los pedidos de los clientes. Esto también tiende a reducir los costes porque el distribuidor está agregando (consolidando) los pedidos de diversas librerías además de los de Amazon.

El comercio electrónico permite a Amazon reducir los costes de las instalaciones porque no necesita la infraestructura de minorista que requiere una cadena de librerías. Inicialmente Amazon no tenía almacén y compraba todos los libros a los distribuidores. Cuando los volúmenes de la demanda eran bajos, el distribuidor era una fuente más económica. Sin embargo, a medida que aumentaba la demanda, Amazon abrió sus propios almacenes para los libros de grandes ventas. Por lo tanto, los costes de instalaciones de Amazon están creciendo, pero siguen siendo inferiores a los de una cadena de librerías. Sin embargo, Amazon sí incurre en mayores costes de procesamiento de los pedidos que las cadenas de librerías. En una librería el cliente elige los libros y sólo se necesita a cajeros para cobrar el



Caso de estudio

dinero. En Amazon no hace falta disponer de cajeros, pero cada pedido tiene que ser cogido del almacén y empaquetado para la entrega. Para los libros que se reciben de los distribuidores, el manejo adicional de éstos en Amazon incrementa el coste de procesar los pedidos.

La distribución de Amazon tiene mayores costes de transporte que en una tienda minorista. Las librerías locales no tienen que asumir el coste de los envíos a los clientes, ya que la mayoría de éstos se llevan el libro en el momento de la venta. Por el contrario, Amazon tiene que asumir este coste, que representa una parte importante del coste de un libro (hasta el cien por cien en un libro barato). A medida que ha aumentado la demanda, Amazon ha abierto seis almacenes, con casi 300.000 metros cuadrados, en un esfuerzo por acercarse al cliente, reducir los costes de transporte y mejorar los tiempos de respuesta (*véase* el *perfil de una empresa global* del Capítulo 2).

Preguntas para el debate

1. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de vender libros a través de Internet?
2. Si se pueden descargar los libros online, ¿cómo cambiará el negocio de Amazon?
3. ¿Qué otros productos que se pueden descargar de Internet podría vender Amazon?
4. ¿Qué pueden ganar las librerías tradicionales con abrir un sitio de comercio electrónico para complementar sus tiendas?

Fuentes: Adaptado de S. Chopra y P. Meindl, *Supply Chain Management*, 2.ª edición (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004); e *Information Week* (26 de julio de 2004): 44-50.

Casos de estudio adicionales

Visite nuestro sitio web www.prenhall.com/heizer para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **La conexión de comercio electrónico de Cisco:** Analiza el impacto de Internet sobre las funciones de operaciones de Cisco.
- **Fruit of the Loom prueba el comercio electrónico:** Analiza cómo Fruit of the Loom integró a sus distribuidores en el comercio electrónico.

Harvard ha seleccionado este caso de la Harvard Business School para acompañar este capítulo (textbookcasematch.hbsp.harvard.edu):

- **H. E. Butt Grocery Co.: La nueva estrategia digital (A)** (#300-106): Analiza cómo la cadena de suministros de esta empresa ha pasado al comercio electrónico.
- **Webvan** (#602-037): Analiza los procesos que utiliza Webvan para llevar la compra al domicilio de sus clientes.
- **Cisco Systems: creando capacidades líderes en Internet** (#301-133): Se analizan los esfuerzos de Cisco para ampliar su utilización de Internet.



BIBLIOGRAFÍA

Chickering, David M., y David Heckerman. “Targeted Advertising on the Web with Inventory Management”. *Interfaces* 33, n.º 5 (septiembre-octubre 2003): pp. 71-77.

Elmaghraby, Wedad. “The Importance of Ordering in Sequential Auctions”. *Management Science* 49, no.º 5 (mayo 2003): pp. 673-682.

Greenstein, M., y M. Vasarhelyi. *Electronic Commerce*, 2.ª ed. Boston: Irwin/McGraw-Hill (2002).

Handfield, Robert B., *et al.* "Avoid the Pitfalls in Supplier Development". *MIT Sloan Management Review* 41, n.º 2 (invierno 2000): pp. 37-48.

Heizer, Jay, y Barry Render. "How E-Commerce Saves Money". *IIE Solutions* (agosto 2000): pp. 22-27.

Lee, Hau L., y S. Whang. "Winning the Last Mile of E-Commerce". *MIT Sloan Management Review* 42, n.º 4 (verano 2001): pp. 54-62.

Porter, Michael. "Strategy and the Internet". *Harvard Business Review* 79, n.º 3 (marzo 2001): pp. 62-78.

Rabinovich, Elliot, y Joseph P. Bailey. "Physical Distribution Service Quality in Internet Retailing". *Journal of Operations Management* 21, n.º 6 (enero 2004): pp. 651-672.

Rayport, J. F., y B. J. Jaworski. *Introduction to Electronic Commerce*. Boston: Irwin/McGraw-Hill (2004).

Smith, Barry C., *et al.* "E-Commerce and Operations Research in Airline Planning, Marketing, and Distribution". *Interfaces* 31, n.º 2 (marzo-abril 2001): pp. 37-55.

Turban, E., *et al. Electronic Commerce: A Managerial Perspective*, 3.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2004).



RECURSOS EN INTERNET

Internet and IT Network
http://www.internet.com

National Telecommunications and Information Administration:
http://www.ntia.doc.gov

Schneider Trucking
http://www.schneider.com

U.S. Department of Commerce. *The Digital Economy*:
http://www.digitaleconomy.gov

GESTIÓN DE INVENTARIOS 2

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando acabe este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

Análisis ABC

Exactitud de los registros

Recuento cíclico

Demanda dependiente e independiente

Costes de almacenamiento, de lanzamiento y de preparación

Describir o explicar:

Las funciones del inventario y los modelos básicos de inventario



PERFIL DE UNA EMPRESA GLOBAL: AMAZON.COM

La gestión del inventarios proporciona una ventaja competitiva en Amazon.com

1. ***Hace un pedido de tres artículos, y una computadora de Seattle se hace cargo de ellos.*** *Una computadora asigna su pedido (un libro, un juego y una cámara digital) a uno de los grandes centros de distribución estadounidense de Amazon, como las instalaciones de 70.000 metros cuadrados en Coffeyville, Kansas.*
2. ***El "maestro de flujos" de Coffeyville recibe su pedido***. *Decide qué trabajadores han de preparar el pedido y adónde tienen que ir para ello.*
3. ***Hileras de luces rojas muestran los productos que se han pedido***. *Los trabajadores van de bombilla en bombilla, sacando del estante de encima de la luz, el artículo que se ha solicitado, y presionando un botón para apagar la luz. Esto se conoce como sistema de "recogida en la luz". Este sistema duplica la velocidad de recogida de los operarios manuales y reduce la tasa de errores a casi cero.*
4. ***Se ponen sus artículos en cajas en una cinta transportadora***. *Cada artículo entra en una gran caja verde que contiene pedidos de muchos clientes. Cuando la caja está llena va pasando por una serie de cintas que recorren más de 15 kilómetros dentro de la fábrica a una velocidad constante de 0,9 metros por segundo. El código de barras de cada artículo se escanea quince veces, por máquinas y por muchos de los 600 trabajadores. El objetivo es reducir los errores a cero: los cambios salen muy caros.*
5. ***Los tres artículos convergen en una rampa que cae dentro de una caja.*** *Todas las cajas verdes llegan a un punto central donde se comparan los códigos de barra con los números del pedido para saber a quién se tiene que enviar cada cosa. Sus tres artículos terminan en una rampa de un metro (una entre varios miles) y son colocados en una caja de cartón con un nuevo código de barras que identifica su pedido. La recogida (picking) está secuenciada para reducir el desplazamiento de los operarios.*
6. ***Cualquier pedido que haya sido solicitado expresamente así se envuelve a mano***. *Amazon forma a un grupo de élite como envolvedores, y cada uno procesa 30 paquetes por hora.*
7. ***La caja se cierra, con cinta adhesiva, se pesa y etiqueta antes de dejar el almacén dentro de un camión***. *La planta de Coffeyville se diseñó para enviar hasta 200.000 cajas al día. Aproximadamente el 60 por ciento de los pedidos se envía a través del servicio postal estadounidense; casi todo lo demás va a través de United Parcel Service.*
8. ***Su pedido llega a la puerta de su casa.*** *En menos de una semana se le entregará el pedido.*

Cuando Jeff Bezos inauguró su revolucionario negocio en 1995, Amazon.com quería ser un minorista "virtual"... sin inventarios, ni almacenes ni costes generales, sólo un montón de computadoras tomando pedidos y autorizando a otros a satisfacerlos. Es evidente que las cosas no salieron exactamente así. En la actualidad Amazon tiene millones de artículos en inventario, entre cientos de miles de cajas en estantes, en almacenes (siete en Estados Unidos y tres en Europa) que ocupan el doble de espacio de superficie que el Empire Estate Building.

Gestionar con precisión este enorme inventario ha obligado a Amazon a convertirse en un líder mundial de la automatización y gestión de almacenes. Este "perfil de una empresa global" muestra lo que ocurre entre bastidores. Cuando hace un pedido a Amazon.com, no sólo está haciendo negocio con una empresa de Internet; está haciendo negocio con una empresa que logra ventaja competitiva gracias a su gestión de inventarios.

Como bien saben en Amazon.com, el inventario es uno de los activos más caros de muchas empresas; a veces llega a representar el 50 por ciento del capital total invertido. Los directores de operaciones de todo el mundo han reconocido ya hace tiempo que la gestión del inventario es crucial. Por un lado, una empresa puede reducir costes reduciendo su inventario; por otro, la producción puede llegar a interrumpirse y hacer que los clientes estén insatisfechos cuando se agota el stock de un artículo. Por eso, las empresas deben conseguir un equilibrio entre la inversión en inventario y el servicio al cliente. No se puede conseguir una estrategia de producción a bajo coste sin una buena gestión de inventarios.

Todas las organizaciones tienen algún sistema de planificación y control de inventarios. Los bancos tienen métodos para controlar su inventario de caja (de dinero). Los hospitales tienen métodos para controlar los suministros de sangre y de fármacos. Los organismos oficiales, los colegios y, por supuesto, casi todas las organizaciones de fabricación y producción se preocupan por planificar y controlar sus inventarios.

En el caso de productos físicos, la organización debe decidir entre producir los bienes o comprarlos. Una vez que se ha tomado esta decisión, el siguiente paso es prever la demanda, como se describe en el Capítulo 4 del volumen *Decisiones Estratégicas*. A continuación, los directores de operaciones deciden el inventario necesario para servir esa demanda. En este capítulo abordaremos las funciones del inventario, las distintas clases de inventarios que existen y su gestión. Finalmente, nos ocuparemos de dos aspectos básicos acerca de los inventarios: cuánto pedir y cuándo pedir.

DIEZ DECISIONES ESTRATÉGICAS DE DIRECCIÓN DE OPERACIONES

Diseño de bienes y servicios
Gestión de la calidad
Estrategia de proceso
Estrategias de localización
Estrategias de layout
Recursos humanos
Dirección de la cadena de suministros
Gestión del inventario
Demanda independiente
Demanda dependiente
Sistemas JIT y Ajustados
Programación
Mantenimiento

FUNCIONES DEL INVENTARIO

Los inventarios pueden cumplir diferentes funciones que aportan flexibilidad a las operaciones de una empresa. Las cuatro funciones del inventario son:

1. *"Desacoplar" o separar diferentes partes del proceso productivo*. Por ejemplo, si los suministros de una empresa fluctúan, puede ser necesario inventario extra para separar al proceso productivo de los proveedores.
2. *Aislar a la empresa de las fluctuaciones de la demanda* y *proporcionar un stock de mercancías que permita al cliente elegir entre ellas*. Este tipo de inventarios son típicos en los establecimientos minoristas.
3. *Aprovechar los descuentos por cantidad*, porque la compra de grandes cantidades puede reducir el coste de las mercancías o su plazo de aprovisionamiento.
4. *Protegerse contra la inflación* y el aumento de los precios.

Tipos de inventarios

Para realizar las funciones del inventario, las empresas mantienen cuatro tipos de inventarios: (1) inventario de materias primas, (2) inventario de trabajos en curso o semielaborado, (3) inventario de suministros de mantenimiento, reparación y operación (MRO), y (4) inventario de productos acabados.

El **inventario de materias primas** ha sido comprado pero todavía no ha sido procesado. Este inventario puede servir para desconectar (es decir, separar) a los proveedores del proceso productivo. Sin embargo, el enfoque preferido es eliminar la variabilidad de los suministradores en calidad, cantidad o plazo de aprovisionamiento de forma que no sea necesaria esta separación. El **inventario de trabajos en curso (*Work in Process,* WIP)** está formado por componentes o materias primas que han sufrido algún tipo de transformación pero que todavía no están terminadas. Este inventario existe por el tiempo que se

Inventario de materias primas
Materiales que normalmente han sido comprados, pero que todavía no han entrado en el proceso de fabricación.

Inventario de productos en curso (semielaborado)
Productos o componentes que ya no son materias primas pero que todavía no son productos acabados.

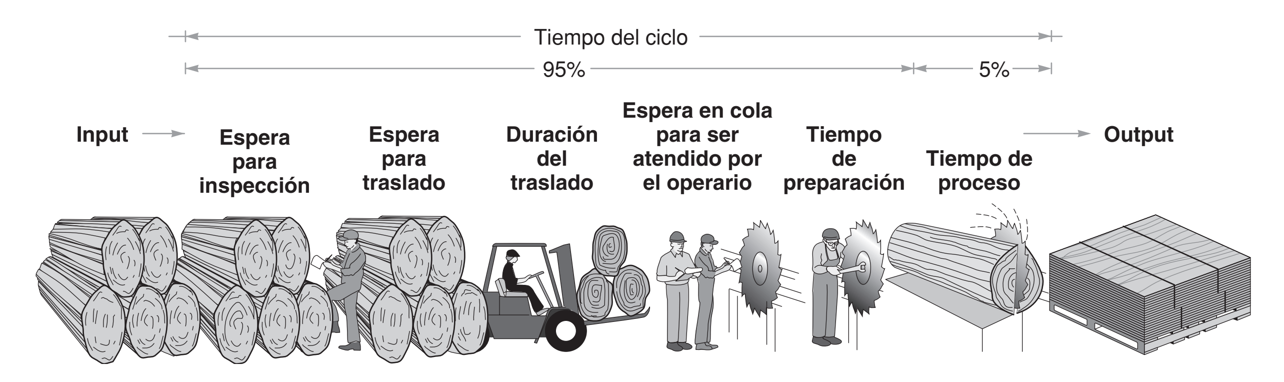


FIGURA 2.1 ■ El ciclo de flujo del material

La mayor parte del tiempo en que el trabajo está en proceso (el 95 por ciento del tiempo ciclo) no es tiempo productivo

necesita para fabricar un producto (llamado *tiempo ciclo*). Reduciendo el tiempo ciclo se reduce el inventario. Muchas veces no es difícil conseguirlo: durante la mayor parte del tiempo que se tarda en elaborar un producto, éste está de hecho esperando a que se le haga alguna operación, es decir, está "esperando". Como muestra la Figura 2.1, el tiempo real de trabajo o tiempo de proceso es una pequeña parte del tiempo de flujo del material por el proceso de producción, a veces tan sólo un 5 por ciento.

MRO
Materiales de mantenimiento, reparación y operación.

Los **inventarios MRO** están compuestos por artículos de **mantenimiento, reparación y operación** necesarios para mantener operativas las máquinas y los procesos. Son necesarios porque la necesidad y el momento para el mantenimiento y reparación de algunos equipos son desconocidos. Aunque la demanda de inventarios MRO es a menudo función de los programas de mantenimiento, hay que tener previstas y anticipadas otras necesidades no programadas de MRO. El **inventario de productos acabados** se compone de los productos que ya están acabados y esperando a ser enviados a los clientes. Los productos acabados deben estocarse porque, habitualmente, no se conoce la demanda futura de los clientes.

Inventario de productos acabados
Artículo finalizado listo para la venta pero que todavía es un activo en los libros de la empresa.

GESTIÓN DE INVENTARIOS

Los directores de operaciones establecen sistemas para gestionar los inventarios. En esta sección examinamos brevemente dos elementos de estos sistemas: (1) cómo se pueden clasificar los artículos del inventario (el llamado *análisis ABC*) y (2) cómo se pueden mantener registros de inventario exactos. Finalmente, examinaremos el control de inventarios en el sector servicios.

Análisis ABC

Análisis ABC
Método para clasificar los artículos disponibles en inventario en tres grupos en función de su volumen anual en dólares.

El **análisis ABC** sirve para clasificar el inventario disponible en tres grupos en función de su volumen anual en dólares. El análisis ABC es una aplicación a los inventarios de lo que se conoce como el *principio de Pareto*. El principio de Pareto afirma que hay "unos pocos críticos y muchos irrelevantes"[1]. La idea consiste en definir políticas de inventarios que

[1] Según Vilfredo Pareto, economista italiano del siglo XIX.

enfoquen los recursos hacia unos *pocos* artículos *críticos*, y no en los muchos triviales. No es razonable hacer un seguimiento de los artículos baratos con la misma intensidad que los que son muy caros.

Para determinar el volumen anual en dólares de cada artículo para el análisis ABC, se multiplica la *demanda anual* de cada artículo del inventario por su *coste unitario*. Los artículos de la *clase A* son aquellos que tienen un volumen anual en dólares alto. Aunque estos artículos pueden representar únicamente sobre un 15 por ciento del total de artículos en inventario, representan el 70 u 80 por ciento del consumo total en dólares. Los artículos de la *clase B* son los que tienen un volumen anual en dólares medio. Estos artículos pueden representar alrededor de un 30 por ciento de todos los artículos en inventario y entre un 15 y un 25 por ciento del valor total. Aquellos con un volumen anual en dólares bajo constituyen la *clase C,* que pueden representar tan sólo un 5 por ciento del volumen anual en dólares, pero alrededor del 55 por ciento del total de los artículos en inventario.

De forma gráfica, el inventario de muchas organizaciones tendría el aspecto representado en la Figura 2.2. Se puede ver un ejemplo de la utilización del análisis ABC en el Ejemplo 1.

Otros criterios, además del volumen anual en dólares, pueden determinar la clasificación de un artículo. Por ejemplo, los cambios de ingeniería previstos, los problemas de entrega, los problemas de calidad o los costes unitarios elevados pueden aconsejar la elevación de un artículo a una clasificación más alta. La ventaja de clasificar los artículos del inventario en grupos es que se pueden establecer diferentes políticas y controles para las diversas clases de artículos.

La mayoría de los sistemas automatizados de gestión de inventarios utilizan el análisis ABC.

EJEMPLO 1

Análisis ABC

La empresa Silicon Chips, Inc., fabricante de chips de alta velocidad DRAM, ha clasificado los 10 artículos de su inventario en función de su volumen anual en dólares. A continuación se muestran los artículos (identificados por número de artículo en stock), su demanda anual, coste unitario, volumen anual en dólares y el porcentaje del total que representa cada uno de los artículos. En la siguiente tabla presentamos estos artículos agrupados en una clasificación ABC.

Cálculo ABC

Número de artículo	Porcentaje del número de artículos en almacén	Volumen anual (unidades)	×	Coste unitario	=	Volumen anual en dólares	Porcentaje del volumen anual en dólares		Clase
#10286	20%	1.000		90,00$		90.000$	38,8%	72%	A
#11526		500		154,00		77.000	33,2%		A
#12760	30%	1.550		17,00		26.350	11,3%	23%	B
#10867		350		42,86		15.001	6,4%		B
#10500		1.000		12,50		12.500	5,4%		B
#12572	50%	600		14,17$		8.502	3,7%	5%	C
#14075		2.000		0,60		1.200	0,5%		C
#01036		100		8,50		850	0,4%		C
#01307		1.200		0,42		504	0,2%		C
#10572		250		0,60		150	0,1%		C
		8.550				232.057$	100,0%		



La desagregación en las categorías A, B y C no es difícil y es rápida. El objetivo es intentar separar lo "importante" de lo "irrelevante".

En John Deere dos trabajadores preparan pedidos para 3.000 componentes en un sistema de seis carruseles utilizando un sofisticado sistema informático. La computadora ahorra tiempo buscando los artículos y acelera el cumplimiento de los pedidos en medio de los kilómetros de estantes del almacén. Mientras un trabajador saca un componente del carrusel, la computadora envía el siguiente componente al carrusel de al lado.

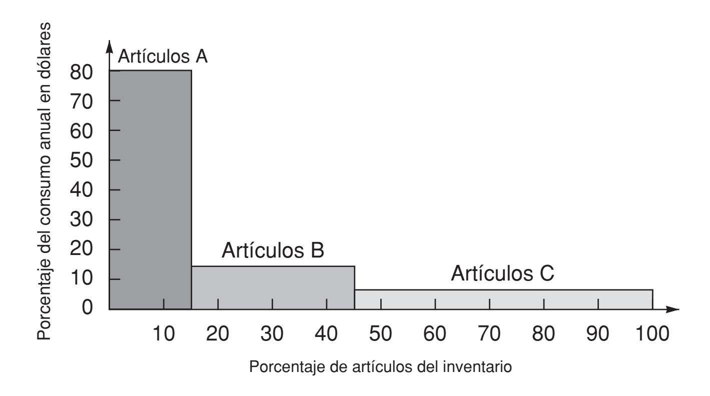
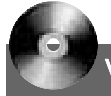


FIGURA 2.2 ■ Representación gráfica del análisis ABC

Algunas de las políticas que se pueden adoptar en función del análisis ABC son las siguientes:

1. Los recursos de compra dedicados al desarrollo de proveedores deben ser muy superiores en el caso de los artículos de la clase A que en el de los de la clase C.
2. Los artículos de la clase A deben estar sometidos a criterios de control físico de inventarios mucho más estrictos que los de las clases B y C; quizás convenga guardarlos en un lugar más seguro y comprobar la exactitud de los registros de inventarios de estos artículos con mayor frecuencia.
3. La previsión de artículos de la clase A puede justificar más atención que la de los demás artículos.

De unas apropiadas políticas de gestión de inventarios puede obtenerse como resultado una mejor previsión, un mejor control físico, mayor fiabilidad de los proveedores y reducir drásticamente el stock de seguridad. El análisis ABC sirve de guía para el desarrollo de estas políticas.



Vídeo 2.1

Control de inventarios en Ambulancias Wheeled Coach

Exactitud de los registros

Unas buenas políticas de inventarios no sirven para nada si la dirección no sabe en todo momento el inventario del que dispone. La exactitud de los registros es un elemento fundamental de los sistemas de producción e inventarios. La precisión en los registros permite a las organizaciones centrarse en aquellos artículos que son necesarios, en vez de conformarse con estar seguro de que "haya un poco de todo" en el inventario. Únicamente cuando una organización sabe exactamente de lo que dispone, puede tomar decisiones correctas sobre compras, programación y distribución.

Para garantizar la exactitud de los registros, hay que anotar correctamente las entradas y salidas de almacén, así como conseguir una buena seguridad en el almacén. Un almacén bien organizado debe tener un acceso restringido, una buena administración y zonas de almacenamiento que contengan cantidades fijas de inventarios. Las cajas, el espacio en las estanterías y las piezas tienen que estar bien rotuladas. El método que siguen los marines estadounidenses para mejorar la exactitud de los registros del inventario se describe en el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "Lo que los marines aprendieron sobre inventarios de Wal-Mart".

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

LO QUE LOS MARINES APRENDIERON SOBRE INVENTARIOS DE WAL-MART

El Cuerpo de Marines de Estados Unidos sabía que tenía problemas de inventarios. Hace unos años, un soldado de Camp Pendleton, cerca de San Diego, hizo un pedido para un recambio, y pasaron semanas hasta que lo recibió, del otro lado de la base. Aún peor, el cuerpo tenía 207 sistemas informáticos a lo ancho del mundo. Apodado el "nido de ratas" por los técnicos de los marines, la mayoría de los sistemas no podían comunicarse entre sí.

Para lograr la victoria sobre los suministros descontrolados, el cuerpo de marines estudió los sistemas de Wal-Mart, Caterpillar, Inc., y UPS. "Estamos en medio de una revolución", comenta el general Gary McKissock. McKissock quiere reducir el inventario del cuerpo a la mitad, ahorrando 200 millones de dólares, y llevar a 2.000 marines de la gestión de inventarios al campo de batalla.

Al sustituir los inventarios por información, el cuerpo no tendrá que almacenar toneladas de suministros junto al campo de batalla, como hizo durante la Guerra del Golfo, sólo para descubrir que no podía averiguar lo que había en los contenedores. Y además estaba el problema de la política de los marines que exigía disponer de una provisión de 60 días de todo lo necesario. McKissock entendió que no había necesidad de abarrotarse de artículos primarios, como los suministros de oficina, que se pueden adquirir en cualquier parte. Y, con la asesoría del sector privado, los marines han actualizado sus almacenes, incorporando escáneres inalámbricos para el control y seguimiento en tiempo real de los inventarios. Ahora, si hace falta enviar un contenedor a una zona de conflicto, éstos tendrán transpondedores de radiofrecuencia que, al escanearse, se comunicarán con una base de datos detallando lo que contiene.

Fuentes: Business Week (24 de diciembre de 2001): 24; y *Federal Computer Week* (11 de diciembre de 2000): 9.

Recuento cíclico

Aunque una organización puede haber realizado importantes esfuerzos para registrar su inventario con exactitud, estos registros deben verificarse mediante una inspección continua. Estas revisiones se denominan **recuento cíclico** o **conteo cíclico**. Tradicionalmente, muchas empresas realizaban inventarios físicos anuales. Esta práctica significaba muchas veces cerrar la instalación para que personal con poca experiencia contase el material y las piezas. En vez de esto, los registros del inventario deben verificarse a través del recuento cíclico. El recuento cíclico se basa en la clasificación del inventario obtenida a partir del análisis ABC. Mediante el recuento cíclico se cuentan los artículos, se comprueban los registros y se documentan las inexactitudes periódicamente. Se busca la causa de las inexactitudes y se toman las medidas necesarias para asegurar la integridad del sistema de inventarios. Los artículos de clase A se recuentan frecuentemente, una vez al mes por ejemplo; los artículos de clase B se contarán con menos frecuencia, quizás una vez al trimestre; y los artículos de clase C se recontarán posiblemente una vez cada seis meses. El Ejemplo 2 describe la forma en la que se calcula el número de artículos de cada clasificación que hay que contar cada día.

Recuento cíclico
Conciliación continua del inventario con los registros del inventario.

En el citado ejemplo, los artículos concretos que hay que recontar se pueden seleccionar cada día de forma secuencial o aleatoria. Otra opción es contar los artículos cuando se vuelven a pedir.

El recuento cíclico tiene las siguientes ventajas:

1. Elimina el cierre y la interrupción de la producción necesarios para realizar los recuentos físicos anuales tradicionales.
2. Elimina los ajustes anuales de inventarios.
3. La comprobación de la exactitud del inventario es realizada por personal especializado.

EJEMPLO 2

Recuento cíclico

La empresa Cole's Trucks, Inc., que fabrica camiones de basura de gran calidad, tiene unos 5.000 artículos en su inventario. Después de contratar durante el verano a Matt Clark, un brillante estudiante de dirección de producción, la empresa clasificó los artículos del inventario en 500 artículos de la clase A, 1.750 artículos de la clase B y 2.750 artículos de la clase C. El criterio que ha establecido la empresa es contar los artículos de la clase A todos los meses (cada 20 días laborables), todos los artículos de la clase B cada trimestre (cada 60 días laborables) y todos los artículos de la clase C cada seis meses (cada 120 días laborables). ¿Cuántos artículos habrá que recontar cada día?

Clase de artículos	Cantidad	Criterio de recuento cíclico	Número de artículos recontados cada día
A	500	Cada mes (20 días laborables)	500/20 = 25/día
B	1.750	Cada trimestre (60 días laborables)	1.750/60 = 29/día
C	2.750	Cada 6 meses (120 días laborables)	2.750/120 = 23/día
			77/día

Se cuentan setenta y siete artículos cada día.

El distribuidor de productos farmacéuticos McKesson Corp., que es uno de los principales proveedores de materiales quirúrgicos del Hospital Arnold Palmer, hace un uso intensivo de lectores de códigos de barras para mantener un control automatizado de los inventarios. El dispositivo que lleva el trabajador en el brazo combina un escáner, una computadora y un aparato emisor y receptor para comprobar los pedidos. Con datos exactos y rápidos, los artículos se verifican fácilmente, mejorando la exactitud de los inventarios y de los envíos.

4. Permite identificar la causa de los errores y tomar medidas correctivas.
5. Mantiene registros de inventario exactos.

Control de inventarios en servicios

Pérdidas
Inventario en tiendas detallistas desaparecido entre la recepción y la venta.

Hurto
Robo de escasa cuantía.

La gestión de los inventarios en servicios merece una consideración especial. Aunque podamos pensar en que el sector de servicios de nuestra economía no tiene inventarios, eso no es verdad. Por ejemplo, los negocios de venta al por mayor y al por menor mantienen grandes inventarios, por lo que la función de gestión de inventarios en estos negocios es muy importante y suele ser un factor que permite la promoción de un directivo. En los negocios de la alimentación, por ejemplo, el control de inventarios puede marcar la diferencia entre el éxito y el fracaso. Además el inventario que está en tránsito o inmovilizado en un almacén es un valor perdido; análogamente, el inventario dañado o robado antes de ser vendido se convierte en una pérdida. En el comercio detallista, el inventario que falta entre el momento de la recepción y el momento de la venta se llama **pérdidas** o **mermas**. Las pérdidas se producen por daños o robos o por una gestión descuidada. Los robos de inventario también se denominan **hurtos**. En el comercio detallista, una pérdida de inventario del 1 por ciento se considera satisfactoria, pero muchas tiendas tienen unas pérdidas superiores al 3 por ciento. Como la repercusión en los beneficios es importante, la exactitud y el control del inventario son fundamentales. Entre las técnicas que pueden ser útiles se encuentran las siguientes:

1. Buena selección, formación y disciplina del personal. Esto nunca es fácil, pero es muy necesario en los negocios de alimentación y en los negocios de ventas al por mayor y al por menor en general, en los que los empleados tienen acceso directo a mercancías consumibles.
2. Estricto control de los envíos recibidos. Esta tarea se realiza en muchas empresas utilizando códigos de barras y sistemas de identificación por radiofrecuencia que

leen todas las entradas de material y automáticamente comparan los artículos recibidos contra las órdenes de compra. Cuando estos sistemas están bien diseñados, es muy difícil saltárselos. Cada artículo tiene su propia unidad de referencia de almacén (*Stock keeping unit,* SKU).

3. Control eficaz de todas las mercancías que salen de la instalación. Este trabajo se realiza mediante códigos de barras en los artículos que se envían, cintas magnéticas en las mercancías o mediante observación directa. La observación directa puede hacerse mediante personal situado en las salidas (como en los almacenes mayoristas de Costco y Sam's Club) o en zonas de gran posibilidad de pérdidas o a través de espejos unidireccionales o vigilancia con cámaras de vídeo.

Con fuertes aumentos estacionales de la demanda, los minoristas y proveedores deben depender de grandes inventarios. Los almacenes suelen estar llenos en preparación de la temporada navideña. Esto puede significar enormes costes de almacenamiento.

El éxito en las operaciones minoristas requiere que se tenga un excelente control en la tienda, con un inventario exacto en su lugar adecuado. Un estudio reciente concluyó que los clientes y los dependientes no podían encontrar el 16 por ciento de los artículos en uno de los mayores comercios detallistas de Estados Unidos: no porque se hubiera roto stock de esos artículos, sino porque estaban en un lugar distinto al que les correspondía (en un almacén, una zona de descarga, o en el pasillo equivocado). Según las estimaciones del investigador, las grandes cadenas minoristas pierden entre el 10 y el 25 por ciento de sus beneficios totales debido a los malos o inexactos registros de inventario[2].

MODELOS DE INVENTARIOS

Examinaremos a continuación diferentes modelos de inventarios y los costes asociados a ellos.

Demanda independiente frente a demanda dependiente

Los modelos de control de inventarios suponen que la demanda de un artículo es independiente o dependiente de la demanda de otros artículos. Por ejemplo, la demanda de frigoríficos es *independiente* de la de hornos eléctricos. Sin embargo, la demanda de componentes de hornos eléctricos *depende* de la de hornos eléctricos.

Este capítulo se centra en la gestión de inventarios cuando la demanda es *independiente*. El Capítulo 4 presenta la gestión de la demanda *dependiente*.

Costes de almacenamiento, de lanzamiento y de preparación

El **coste de almacenamiento** es el coste asociado a la posesión y mantenimiento de los inventarios a lo largo del tiempo. Por tanto, los costes de almacenamiento incluyen también los que se deben a la obsolescencia de los materiales y los costes relacionados con el almacenamiento, tales como los seguros, el personal extra para su manutención y control, y el pago de intereses. La Tabla 2.1 muestra las clases de costes que hay que tener en cuenta para calcular los costes de almacenamiento. Muchas empresas no tienen en cuenta todos los componentes de los costes de almacenamiento, y por ello a menudo los infravaloran.

Coste de almacenamiento
Coste asociado a la posesión y mantenimiento de los inventarios a lo largo del tiempo.

El **coste de lanzamiento** de un pedido incluye los costes de los suministros, impresos, procesamiento del pedido, soporte administrativo, etcétera. Cuando los pedidos se están fabricando, también existen costes de lanzamiento, pero en este caso son una parte de lo

Costes de lanzamiento
Coste del proceso de efectuar un pedido al proveedor.

[2] A. Raman, N. DeHoratius y Z. Ton, "Execution: The Missing Link in Retail Operations", *California Management Review* 43, n.º 3 (primavera de 2001): 136-141.

Tabla 2.1 ■ Determinación de los costes de almacenamiento de los inventarios

Categoría	Coste (y rango) como porcentaje del valor de inventario
Costes de edificio (alquiler o depreciación del edifico, costes de operación, impuestos y seguros)	6% (3-10%)
Costes de manutención de materiales (leasing o depreciación de los equipos, electricidad y costes operativos)	3% (1-3,5%)
Costes de mano de obra	3% (3-5%)
Costes de inversión (costes de los préstamos, impuestos y seguros del inventario)	11% (6-24%)
Hurtos, desechos y obsolescencia	3% (2-5%)
Coste de almacenamiento total	**26%**

Nota: Todas las cifras son aproximadas, y pueden variar sustancialmente dependiendo de la naturaleza del negocio, de la localización y de los tipos de interés vigentes. Cualquier coste de almacenamiento de menos del 15 por ciento resulta sospechoso puesto que los costes de almacenamiento de inventarios representan, aproximadamente, el 40 por ciento del valor de los bienes en inventario.

Costes de preparación
Coste de preparar una máquina o un proceso para comenzar la producción.

Plazo de preparación
Tiempo necesario para preparar una máquina o proceso para comenzar la producción.

que se llaman costes de preparación. El **coste de preparación** es el coste correspondiente a la preparación de una máquina o proceso para fabricar un pedido. Incluyen el tiempo y el trabajo necesarios para limpiar y cambiar herramientas o soportes. Los directores de operaciones pueden reducir los costes de lanzamiento reduciendo los costes de preparación y mediante la utilización de procedimientos tan eficientes como la emisión de pedidos electrónicos y el pago electrónico.

En muchos entornos, el coste de preparación está altamente correlacionado con el **tiempo de preparación**. Las preparaciones requieren normalmente una importante cantidad de trabajo antes de emprender la preparación propiamente dicha en el centro de trabajo. Si se hace una planificación correcta, se puede hacer gran parte del trabajo que lleva consigo la preparación antes de parar la máquina o el proceso y, por tanto, reducir sustancialmente el tiempo de preparación. Los fabricantes de primera clase mundial hacen actualmente en menos de un minuto trabajos de preparación de máquinas y de procesos que tardaban normalmente varias horas en realizarse. Como veremos más adelante en este capítulo, la reducción de los tiempos de preparación es una excelente manera de reducir la inversión en inventario y de mejorar la productividad.

MODELOS DE INVENTARIOS CON DEMANDA INDEPENDIENTE

En esta sección presentamos tres modelos de inventarios que resuelven dos importantes cuestiones: *cuándo pedir* y *cuánto pedir*. Estos modelos de demanda *independiente* son:

1. Modelo básico de la cantidad económica de pedido o lote económico (EOQ: *Economic Order Quantity*).
2. Modelo de cantidad de pedido de producción.
3. Modelo de descuento por cantidad.

Modelo básico de la cantidad económica de pedido (EOQ)

El **modelo de la cantidad económica de pedido (EOQ)** es una de las técnicas de control de inventarios más antiguas y más conocidas[3]. Esta técnica es relativamente fácil de usar pero está basada en varias hipótesis:

Modelo de la cantidad económica de pedido (EOQ)
Técnica de control de inventarios que minimiza los costes totales de lanzamiento y de almacenamiento.

1. La demanda es conocida, constante e independiente.
2. El plazo de aprovisionamiento (es decir, el tiempo desde que se cursa el pedido hasta que se recibe la mercancía) es conocido y constante, y en este modelo es cero.
3. La recepción del inventario es instantánea y completa. En otras palabras, la cantidad pedida llega de una vez y en un solo lote.
4. No hay posibilidad de descuentos por cantidad.
5. Los únicos costes variables son el coste de preparar o de efectuar un pedido (coste de lanzamiento) y el coste de mantener el inventario a lo largo del tiempo (coste de posesión o mantenimiento). Estos costes fueron comentados en la sección anterior.
6. Se pueden evitar completamente las roturas de stock si se cursan los pedidos en el momento adecuado.

Con estos supuestos, el gráfico de utilización del inventario a lo largo del tiempo tiene forma de diente de sierra, como se muestra en la Figura 2.3. En dicha figura Q representa la cantidad que se pide. Si esta cantidad es de 500 vestidos, los 500 vestidos llegan a la vez (cuando se recibe el pedido). Por tanto, el nivel de inventarios pasa de 0 a 500 vestidos de golpe. En general, el nivel de inventarios salta de 0 a Q unidades cuando llega un pedido.

Como la demanda es constante a lo largo del tiempo, el inventario disminuye de forma uniforme a lo largo del tiempo (*véanse* las líneas inclinadas en la Figura 2.3). Cada vez que el nivel de inventario llega a 0, se cursa y se recibe un pedido y el nivel de inventario pasa de 0 a Q unidades (representado por las líneas verticales). Este proceso se repite indefinidamente a lo largo del tiempo.

Minimización de costes

El objetivo de la mayoría de los modelos de inventarios es minimizar los costes totales. Con los supuestos que acabamos de ver, los costes significativos son los de preparación (o de lanzamiento) y los de almacenamiento (o tenencia). Todos los demás costes, como el coste del

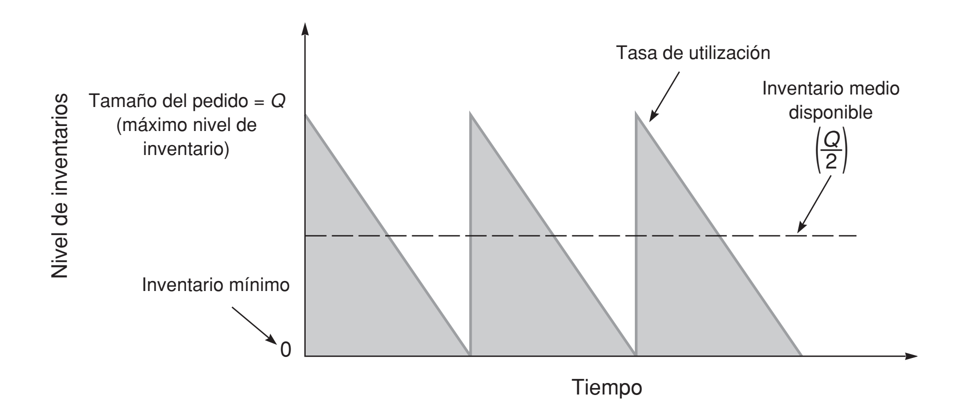


FIGURA 2.3 ■ Utilización del inventario a lo largo del tiempo

[3] La investigación sobre el EOQ se remonta a 1915; *véase* Ford W. Harris, *Operations and Costs* (Chicago: A. W. Shaw, 1915).

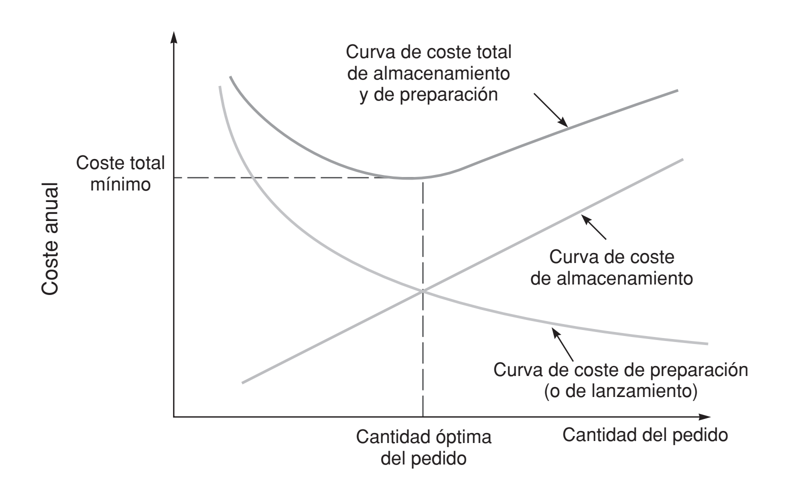
propio inventario, son constantes. Por tanto, si minimizamos la suma de los costes de preparación y de almacenamiento, estaremos minimizando también el coste total. Para ayudarle a visualizarlo, en la Figura 2.4 se ha representado el coste total en función de la cantidad de pedido, Q. El tamaño óptimo del pedido, Q^*, será la cantidad que reduce al mínimo el coste total. Conforme aumenta la cantidad de pedido, el número total de pedidos efectuados al año disminuye. Por tanto, conforme aumenta la cantidad pedida, el coste anual de preparación o lanzamiento disminuirá. Pero conforme aumenta la cantidad del pedido, los costes de almacenamiento aumentarán debido a los mayores inventarios medios que se han de mantener.

Como se puede ver en la Figura 2.4, la reducción ya sea de los costes de almacenamiento o de los de preparación reduce el valor de la curva de coste total. Una reducción en la curva del coste de preparación también reduce la cantidad de pedido óptima (tamaño del lote). Además, los lotes de pequeño tamaño tienen una influencia positiva en la calidad y en la flexibilidad de la producción. En Toshiba, un conglomerado japonés que factura 40.000 millones de dólares, los trabajadores pueden hacer solamente 10 computadoras portátiles y entonces cambiar de modelo. Esta flexibilidad en el tamaño del lote ha permitido a Toshiba avanzar hacia un sistema de personalización en masa "contra pedido", una capacidad importante en una industria que tiene unos ciclos de vida de producto que se miden en meses, y no en años.

Obsérvese que en la Figura 2.4 el tamaño óptimo de pedido corresponde al punto en que se cortan la curva del coste de lanzamiento y la curva del coste de almacenamiento. No es una casualidad. Con el modelo EOQ, el tamaño de pedido óptimo corresponde al punto en el que el coste total de preparación es igual al coste total de almacenamiento[4]. Utilizamos este hecho para desarrollar ecuaciones que resuelven directamente el valor de Q^*. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Desarrollar la fórmula de los costes de preparación o lanzamiento.
2. Desarrollar la fórmula de los costes de almacenamiento.

FIGURA 2.4 ■ Coste total en función de la cantidad del pedido



[4] Éste el es caso en el que los costes de almacenamiento siguen una línea recta y parten del origen; es decir, cuando los costes de inventario no disminuyen (o aumentan) cuando el volumen de inventario aumenta y todos los costes de almacenamiento presentan pequeños incrementos. Además, probablemente cada vez que se realiza una preparación (lanzamiento) hay algún aprendizaje, lo que reduce los costes de preparación (lanzamiento) sucesivos. Por consiguiente, el modelo EOQ es, probablemente, un caso especial. Sin embargo, aceptamos la opinión ortodoxa de que este modelo es una aproximación razonable.

3. Igualar los costes de almacenamiento y de preparación.
4. Resolver la ecuación para calcular el tamaño óptimo de pedido.

Utilizando las siguientes variables, podemos determinar los costes de preparación y de almacenamiento y encontrar el valor de Q^*:

Q = Número de unidades por pedido
Q^* = Número óptimo de unidades por pedido (EOQ)
D = Demanda anual en unidades del artículo de inventario
S = Coste de preparación o de lanzamiento de cada pedido
H = Coste de almacenamiento por unidad y año

1. Coste de preparación anual = (Número de pedidos lanzados por año) × (Coste de preparación o lanzamiento por pedido)

$$= \left(\frac{\text{Demanda anual}}{\text{Número de unidades por pedido}}\right)(\text{Coste de preparación por pedido})$$

$$= \left(\frac{D}{Q}\right)(S)$$

$$= \frac{D}{Q}S$$

2. Coste de almacenamiento anual = (Nivel de inventario medio) × (Coste de almacenamiento por unidad y año)

$$= \left(\frac{\text{Cantidad del pedido}}{2}\right)(\text{Coste de almacenamiento por unidad por año})$$

$$= \left(\frac{Q}{2}\right)(H)$$

$$= \frac{Q}{2}H$$

3. La cantidad óptima de pedido corresponde al valor en el que el coste de almacenamiento anual es igual al coste de preparación anual, es decir,

$$\frac{D}{Q}S = \frac{Q}{2}H$$

4. Para calcular el valor de Q^*, simplemente, multiplicamos en cruz y despejamos Q en el miembro izquierdo de la igualdad.

$$2DS = Q^2H$$

$$Q^2 = \frac{2DS}{H}$$

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Ahora que se han deducido las ecuaciones para calcular la cantidad de pedido óptima, Q^*, es posible resolver problemas de inventarios directamente, como en el Ejemplo 3.

EJEMPLO 3



Cálculo del tamaño de pedido óptimo

La empresa Sharp, Inc., que vende agujas hipodérmicas indoloras a hospitales, desearía reducir el coste de su inventario determinando el número óptimo de agujas hipodérmicas en cada pedido. La demanda anual es de 1.000 unidades; el coste de preparación o lanzamiento por pedido es de 10 dólares; y el coste de almacenamiento por unidad y año es de 0,50 dólares. Utilizando estos datos, calculamos el número óptimo de unidades por pedido:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

$$Q^* = \sqrt{\frac{2(1.000)(10)}{0,50}} = \sqrt{40.000} = 200 \text{ unidades}$$

También se puede calcular el número esperado de pedidos a cursar durante un año (N) y el tiempo esperado entre pedidos (T), de la siguiente manera:

$$\text{Número estimado de pedidos} = N = \frac{\text{Demanda}}{\text{Cantidad óptima de pedido}} = \frac{D}{Q^*} \quad \textbf{(2.2)}$$

$$\text{Tiempo estimado entre pedidos} = T = \frac{\text{Número de días laborables por año}}{N} \quad \textbf{(2.3)}$$

El Ejemplo 4 ilustra este concepto.

EJEMPLO 4



Los Ejemplos 3, 4 y 5 se analizan con más detalle en el ejercicio Active Model 12.1 del CD-ROM y en uno de los problemas al final del capítulo.

Cálculo del número de pedidos y del tiempo que transcurre entre pedidos

Utilizando los datos de Sharp, Inc., del Ejemplo 3, y suponiendo un año de 250 días laborables, calculamos el número de pedidos (N) y el tiempo esperado entre pedidos (T) de la siguiente manera:

$$N = \frac{\text{Demanda}}{\text{Cantidad del pedido}}$$

$$= \frac{1.000}{200} = 5 \text{ pedidos por año}$$

$$T = \frac{\text{Número de días laborables por año}}{\text{Número estimado de pedidos}}$$

$$= \frac{250 \text{ días laborables por año}}{5 \text{ pedidos}} = 50 \text{ días entre pedidos}$$

Como vimos antes en esta misma sección, el coste variable anual total del inventario es la suma de los costes de preparación y de almacenamiento:

$$\text{Coste total anual} = \text{Coste de preparación} + \text{Coste de almacenamiento} \quad \textbf{(2.4)}$$

En términos de las variables del modelo, podemos expresar el coste total, *CT*, como

$$CT = \frac{D}{Q}S + \frac{Q}{2}H \qquad \textbf{(2.5)}$$

El Ejemplo 5 muestra cómo se aplica esta fórmula.

EJEMPLO 5

Cálculo del coste total

Utilizando de nuevo los datos correspondientes a Sharp, Inc., de los Ejemplos 3 y 4, calculamos el coste de inventario total anual de la siguiente manera:

$$CT = \frac{D}{Q}S + \frac{Q}{2}\text{H}$$

$$= \frac{1.000}{200}(10\$) + \frac{200}{2}(0{,}50\$)$$

$$= (5)(10\$) + (100)(0{,}50\$)$$

$$= 50\$ + 50\$ = 100\$$$

A una tienda le lleva 4 semanas que el fabricante le sirva un pedido de pantalones vaqueros Levi's 501. Si la tienda vende 10 pares de Levi's de la talla 30-32 por semana, el encargado de la tienda podría preparar dos contenedores, colocar 40 pares de pantalones en el segundo contenedor y cursar un pedido cada vez que se vacíe el primer contenedor. Esto sería un sistema de punto de pedido. Este sistema se llama también sistema de las "dos cajas" (Two-bin system) y es un ejemplo de un enfoque de gestión de inventarios muy elemental, pero eficaz.

La expresión del coste de inventario total puede escribirse también incluyendo el coste real del material adquirido. Si suponemos que la demanda anual y el precio por aguja hipodérmica tienen valores conocidos (por ejemplo, 1.000 agujas por año a $P = 10\$$) y el coste total anual debe incluir el precio de compra, la ecuación (2.5) pasa a ser:

$$CT = \frac{D}{Q}S + \frac{Q}{2}H + PD$$

Como el coste del material no depende de la política concreta de pedidos, se incurre de cualquier manera en un coste anual de material de $D \times P = (1.000)(10\$) = 10.000$ dólares. (Más adelante, en este mismo capítulo, abordaremos el caso en el que esto puede no ser verdad, es decir, cuando existen descuentos por el tamaño del pedido)[5].

Modelo robusto Una ventaja del modelo EOQ es que es **robusto**. Al decir que es robusto queremos decir que da respuestas satisfactorias incluso con variaciones importantes de sus parámetros. Como hemos observado, muchas veces es difícil determinar con exactitud

Robusto
Modelo que proporciona respuestas satisfactorias incluso con variaciones importantes de sus parámetros.

---

[5] Se puede determinar también la fórmula de la cantidad económica de pedido (Q^*) hallando el valor en el que la curva del coste total alcanza su mínimo (es decir, en el que la pendiente de la curva de coste total es cero). Mediante el cálculo diferencial, igualamos a cero la derivada del coste total con respecto a Q^*.

Los cálculos para determinar el mínimo de $CT = \frac{D}{Q}S + \frac{Q}{2}H + PD$

son:

$$\frac{d(TC)}{dQ} = \left(\frac{-DS}{Q^2}\right) + \frac{H}{2} + 0 = 0$$

Por lo tanto,

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

EJEMPLO 6

El modelo EOQ es un modelo robusto

Si en los ejemplos anteriores la dirección de Sharp, Inc. infravaloró la demanda total anual en un 50 por ciento (es decir, que la demanda es realmente de 1.500 agujas en vez de 1.000), utilizando el mismo Q, el coste anual del inventario aumenta únicamente en 25 dólares (100 en vez de 125), o un 25 por ciento. Esto se debe a lo siguiente:

Si la demanda del Ejemplo 5 es realmente de 1.500 agujas en vez de 1.000, pero la dirección utiliza una cantidad de pedido de $Q = 200$ (cuando debería ser $Q = 244{,}9$ debido a que la demanda es $D = 1.500$), la suma de los costes de preparación y de almacenamiento aumenta un 25 por ciento:

$$\text{Coste anual} = \frac{D}{Q}S + \frac{Q}{2}H$$

$$= \frac{1.500}{200}(10\$) + \frac{200}{2}(0{,}50\$)$$

$$= 75\$ + 50\$ = 125\$$$

Sin embargo, si se hubiera sabido que la demanda era de 1.500 y hubiéramos usado el valor de Q óptimo correspondiente de 244,9 unidades, hubiéramos gastado 122,48 dólares, como se muestra a continuación:

$$\text{Coste anual} = \frac{1.500}{244{,}9}(10\$) + \frac{244{,}9}{2}(0{,}50\$)$$

$$= 6{,}125\ (\$10) + 122{,}45\ (0{,}50\$)$$

$$= 61{,}24\$ + 61{,}24\$ = 122{,}48\$$$

Obsérvese que el coste de 125 dólares, que corresponde a una estimación de la demanda sustancialmente errónea, es sólo un 2 por ciento mayor (2,52/122,48) que lo que se hubiera pagado si se hubiera conocido la demanda real y se hubieran cursado los pedidos con arreglo a ella ($D = 1.500$, $Q = 244{,}9$).

los costes de lanzamiento y de almacenamiento del inventario. Por tanto, un modelo robusto es muy conveniente. El coste total del EOQ cambia poco en las proximidades del mínimo. La curva es muy plana. Esto significa que cualquier variación en los costes de preparación, de almacenamiento, en la demanda, o incluso en el EOQ provoca diferencias relativamente pequeñas en el coste total. El Ejemplo 6 muestra la robustez del EOQ.

Podemos concluir que el EOQ es, desde luego, robusto y que la existencia de errores importantes no aumenta demasiado los costes. Esta característica del modelo EOQ es muy práctica porque nuestra capacidad para prever con exactitud la demanda y los costes de preparación y de almacenamiento es limitada.

Punto de pedido (o de reorden)

Plazo de aprovisionamiento
En sistemas de compras, el tiempo que transcurre desde que se emite un pedido hasta su recepción; en sistemas de producción, es el tiempo de espera, transporte interno, cola, preparación y producción de cada componente producido.

Después de decidir *cuánto* hay que pedir, nos fijaremos en la segunda pregunta relativa al inventario, *cuándo* hay que pedir. Los modelos sencillos de inventarios suponen que la recepción de un pedido es instantánea. En otras palabras, suponen (1) que una empresa lanzará un pedido cuando el nivel de inventario de un artículo determinado llegue a cero, y (2) que se recibirá el pedido inmediatamente. Sin embargo, el tiempo entre la emisión y la recepción de un pedido, llamado **plazo de aprovisionamiento o de entrega**, puede ser

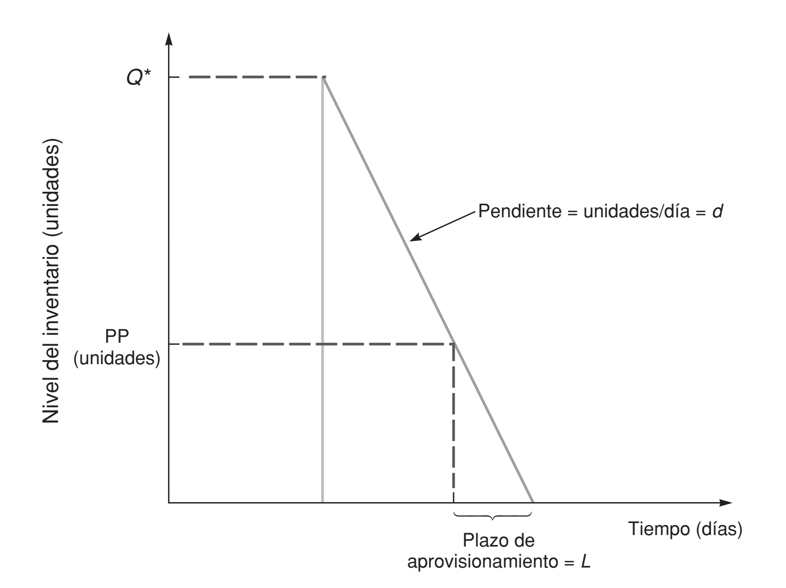


FIGURA 2.5 ■ La curva del punto de pedido (PP)

Q es el tamaño óptimo del pedido, y el plazo de aprovisionamiento representa el tiempo que transcurre entre la emisión del pedido y su recepción*

tan corto como unas pocas horas o tan largo como varios meses. Por lo tanto, la decisión acerca del momento oportuno para cursar un pedido se expresa normalmente en términos de un **punto de pedido (PP)**, que es el nivel de inventario llegado al cual se debe cursar un pedido (*véase* la Figura 2.5).

Punto de pedido
Nivel de inventarios (punto) en el cual hay que emprender una acción para reponer el artículo almacenado.

El punto de emisión del pedido (PP) viene dado por

$$\begin{aligned} PP &= \text{(Demanda por día)(Plazo de entrega de un pedido en días)} \\ &= d \times L \end{aligned} \quad \textbf{(2.6)}$$

Esta ecuación del PP *supone que la demanda durante el plazo de aprovisionamiento y el propio plazo de aprovisionamiento son constantes*. Cuando esto no es cierto, se debe añadir una cantidad adicional, a menudo denominada **stock de seguridad**.

Stock de seguridad
Stock extra que se reserva para hacer frente a una demanda irregular; un amortiguador (buffer).

La demanda por día, d, se calcula dividiendo la demanda anual, D, entre el número de días laborables por año:

$$d = \frac{D}{\text{Número de días laborables por año}}$$

El cálculo del punto de pedido se muestra en el Ejemplo 7.

EJEMPLO 7

Cálculo del punto de pedido (PP)

Un distribuidor de Apple tiene una demanda de 8.000 iPods anuales. La empresa trabaja durante 250 días al año. Como término medio, la entrega de un pedido tarda tres días laborables. Calculamos el punto de pedido de la siguiente manera:

$$d = \frac{D}{\text{Número de días laborables por año}} = \frac{8.000}{250} = 32 \text{ unidades}$$

$$PP = \text{Punto de pedido} = d \times L = 32 \text{ unidades por día} \times 3 \text{ días} = 96 \text{ unidades.}$$

Por tanto, cuando el nivel del inventario desciende a 96 unidades, hay que cursar un pedido. El pedido llegará tres días más tarde, justo cuando se haya acabado el stock.

Modelo de la cantidad de pedido en producción

En el anterior modelo de inventario suponíamos que todo el pedido se recibía al mismo tiempo. Sin embargo, hay veces en que se recibe el contenido del pedido a lo largo de un periodo de tiempo. En esos casos hay que recurrir a un modelo de inventario diferente, en el que no haya que suponer la recepción instantánea del pedido. Este modelo es aplicable a dos situaciones: (1) cuando el inventario fluye continuamente o va acumulándose a lo largo de un periodo de tiempo después de haber lanzado un pedido o (2) cuando las unidades se producen y se venden simultáneamente. En estas circunstancias, se tienen en cuenta el ritmo o tasa de producción diaria (o de flujo de inventario) y el ritmo o tasa de demanda diaria. La Figura 2.6 muestra los niveles del inventario en función del tiempo.

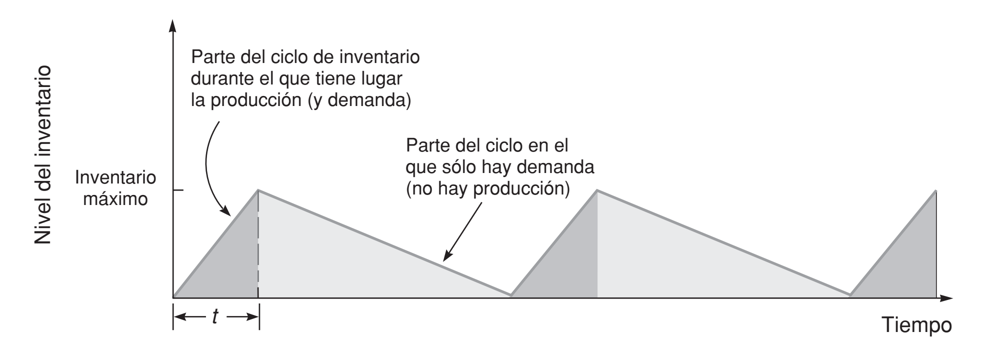


FIGURA 2.6 ■ Variación de los niveles del inventario a lo largo del tiempo en el modelo de producción

Modelo de la cantidad de pedido en producción
Técnica para determinar la cantidad económica de pedido aplicada a los pedidos de producción.

Como este modelo es especialmente apropiado para actividades productivas, se lo llama normalmente **Modelo de la cantidad de pedido en producción**. Es muy útil cuando el inventario se constituye de forma continua a lo largo de un periodo de tiempo y cuando son aplicables las hipótesis del modelo de la cantidad económica de pedido. Desarrollamos este modelo igualando los costes de lanzamiento o de preparación con los costes de almacenamiento y resolviendo la ecuación para calcular el tamaño óptimo de la orden o pedido, Q^*. Utilizando los siguientes símbolos, podemos determinar la expresión del coste anual de almacenamiento del inventario en el modelo de la cantidad de pedido en producción:

Q = Número de piezas por orden o pedido
H = Coste de almacenamiento por unidad y año
p = Ritmo o tasa de producción diario
d = Demanda diaria o tasa de consumo
t = Duración del ciclo (de la tanda) de producción en días

1. $$\begin{pmatrix}\text{Coste anual de almace-}\\\text{namiento del inventario}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{Nivel del inven-}\\\text{tario medio}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\text{Coste de almacenamiento}\\\text{por unidad y por año}\end{pmatrix}$$

2. $$\begin{pmatrix}\text{Nivel del inven-}\\\text{tario medio}\end{pmatrix} = (\text{Nivel del inventario máximo})/2$$

3. $\begin{pmatrix}\text{Nivel del inven-}\\ \text{tario máximo}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{Producción total durante}\\ \text{el ciclo de producción}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\text{Consumo total durante}\\ \text{el ciclo de producción}\end{pmatrix}$

$$= pt - dt$$

Sin embargo, Q = Producción total = pt, por lo que $t = Q/p$. En consecuencia,

$$\text{Nivel del inventario máximo} = p\left(\frac{Q}{p}\right) - d\left(\frac{Q}{p}\right)$$

$$= Q - \frac{d}{p}Q$$

$$= Q\left(1 - \frac{d}{p}\right)$$

4. El coste anual de almacenamiento del inventario (o simplemente, coste del inventario) =

$$\frac{\text{Nivel del inventario máximo}}{2}(H) = \frac{Q}{2}\left[1 - \left(\frac{d}{p}\right)\right]H$$

Cada orden o pedido puede requerir un cambio en la forma en que está preparada una máquina o un proceso. La reducción del tiempo de preparación suele llevar consigo una reducción del coste de preparación; y la reducción del coste de preparación permite producir de forma económica lotes de producción más pequeños. Cada vez más, la preparación (y las operaciones) de las máquinas son controladas por computadoras que utilizan programas informáticos escritos previamente.

Utilizando esta expresión del coste de almacenamiento y la expresión del coste de preparación desarrollada en el modelo básico EOQ, calculamos el número óptimo de unidades por orden o pedido, equiparando los costes de preparación y de almacenamiento.

$$\text{Coste de preparación} = (D/Q)\,S$$

$$\text{Coste de almacenamiento} = \frac{1}{2}HQ[1 - (d/p)]$$

La diferencia entre el modelo de pedido de producción y el modelo básico EOQ está en el coste de almacenamiento anual, que es menor en el modelo de la cantidad de pedido en producción.

Igualando los costes de preparación y de almacenamiento para obtener Q_p^*:

$$\frac{D}{Q}S = \frac{1}{2}HQ[1 - (d/p)]$$

$$Q^2 = \frac{2DS}{H[1 - (d/p)]}$$

$$Q_p^* = \sqrt{\frac{2DS}{H[1 - (d/p)]}} \qquad \textbf{(2.7)}$$

En el Ejemplo 8, utilizamos la ecuación anterior de Q_p^* para calcular la cantidad óptima de pedido o producción cuando el inventario se consume conforme se va produciendo.

EJEMPLO 8

Modelo de la cantidad de pedido en producción

La empresa Nathan Manufacturing, Inc., fabrica y vende tapacubos para el mercado detallista de recambios de automóvil. La previsión de Nathan para sus tapacubos para rueda de radios es de 1.000 unidades para el próximo año, con una demanda diaria media de 4 unidades. Sin embargo, el proceso de producción alcanza su máxima eficiencia con 8 unidades por día. Por ello, la empresa fabrica 8 unidades cada día de las que sólo utiliza 4. Dados los siguientes valores, calcule el número óptimo de unidades por pedido. (*Nota:* Esta fábrica programa la producción de este tapacubos solamente cuando es necesario, durante los 250 días que trabaja la fábrica).



Archivo de datos de Excel OM Ch12Ex1.xla



El Ejemplo 8 se analiza con más detalle en el ejercicio Active Model 12.2 del CD-ROM.

Demanda anual $= D =$ 1.000 unidades

Coste de preparación $= S =$ 10\$

Coste de almacenamiento $= H =$ 0,50\$ por unidad al año

Ritmo de producción diaria $= p =$ 8 unidades al día

Ritmo de demanda diaria $= d =$ 4 unidades al día

$$Q_p^* = \sqrt{\frac{2DS}{H[1 - (d/p)]}}$$

$$Q_p^* = \sqrt{\frac{2(1.000)(10)}{0{,}50[1 - (4/8)]}}$$

$$= \sqrt{\frac{20.000}{0{,}50(1/2)}} = \sqrt{80.000}$$

$$= 282{,}8 \text{ tapacubos} \cong 283 \text{ tapacubos}$$

Se puede comparar esta solución con la del Ejemplo 3. Eliminando la hipótesis de la recepción instantánea de los pedidos, y con $p = 8$ y $d = 4$, ha resultado un incremento de Q^* de 200 unidades en el Ejemplo 3 a 283 unidades en este caso. Este incremento de Q^* se debe a la reducción de los costes de almacenamiento de 0,50 a (0,50\$ × 1/2), lo que provoca un Q^* óptimo mayor. Destaquemos también que

$$d = 4 = \frac{D}{\text{Número de días de trabajo en la fábrica}} = \frac{1.000}{250}$$

También podemos calcular Q_p^* cuando se dispone de datos anuales. Utilizando datos anuales, podemos expresar Q_p^* como

$$Q_p^* = \sqrt{\frac{2DS}{H\left(1 - \dfrac{\text{tasa de demanda actual}}{\text{tasa de producción anual}}\right)}} \qquad \textbf{(2.8)}$$

Modelos de descuento por cantidad

Descuento por cantidad
Precio reducido para los artículos comprados en grandes cantidades.

Para aumentar las ventas, muchas empresas ofrecen a sus clientes descuentos en el precio en función del tamaño del pedido. Un **descuento por cantidad** es sencillamente un precio reducido (P) para un artículo cuando se compra en grandes cantidades. Es habitual encontrar planes de descuento con diferentes descuentos en función de la cantidad del pedido. La Tabla 2.2 presenta un programa típico de descuento por cantidad de pedido. Como puede verse en la tabla, el precio normal del artículo es de 5 dólares. Cuando se pide entre 1.000 y 1.999 unidades de una vez, el precio por unidad se reduce a 4,80 dólares; cuando la cantidad pedida de una vez es de 2.000 unidades o más, el precio es de 4,75\$/unidad. Como siempre, la dirección debe decidir cuándo y cuánto hay que pedir. Sin embargo, si existe la oportunidad de ahorrar dinero a través de descuentos por cantidad, ¿cómo debe tomar estas decisiones el director de operaciones?

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

EXACTITUD DEL INVENTARIO EN MILTON BRADLEY

Milton Bradley, una división de Hasbro Inc. ha estado fabricando juguetes desde hace más de 100 años. Fundada por Milton Bradley en 1860, la empresa empezó haciendo una litografía de Abraham Lincoln. Utilizando sus capacidades de impresión, Bradley desarrolló juegos, entre ellos el Juego de la Vida, el Juego de la Oca, Candy Land, Scrabble (juego de palabras) y Lite Brite. En la actualidad, la empresa fabrica cientos de juegos, y para ello necesita miles de millones de piezas de plástico.

Una vez que Milton Bradley ha calculado las cantidades óptimas de cada tanda de producción, tiene que fabricarlas y ensamblarlas como parte del juego propiamente dicho. Algunos juegos requieren literalmente cientos de piezas de plástico, incluyendo ruletas, hoteles, personas, animales, automóviles, etcétera. Según Gary Brennan, director de producción, el aspecto más importante para la credibilidad de la empresa es disponer del número de piezas adecuadas para los juguetes adecuados y las líneas de producción pertinentes. Algunos pedidos pueden requerir 20.000 o más juegos totalmente montados para ser entregados en los almacenes de los clientes en cuestión de días.

Los juegos con un número de piezas incorrecto pueden hacer que los clientes queden muy insatisfechos. También exige tiempo y dinero para Milton Bradley el suministrar las piezas que faltan o gestionar la devolución de juguetes o juegos. Cuando se descubre que hay una rotura de stock durante la etapa de ensamblaje, hay que detener toda la tanda de producción hasta que se corrija el problema. El contar las piezas, a mano o con máquinas, no siempre es exacto. Por ello, ahora Milton Bradley pesa las piezas y los juegos completos para saber si incluyen el número de componentes correcto. Si el peso no es exacto, hay un problema que se soluciona antes del envío. Utilizando balanzas digitales de alta precisión, Milton Bradley puede ahora poner las piezas adecuadas en el juego adecuado en el momento adecuado. Sin esta sencilla innovación, la programación más sofisticada de la producción no tendría sentido.

Fuentes: The Wall Street Journal (15 de abril de 1999): B1; y *Plastics World* (marzo de 1997): 22-26.

Al igual que en los demás modelos de inventario de los que hemos hablado hasta ahora, el objetivo global es minimizar el coste total. Puesto que, en la Tabla 2.2, el coste unitario en el tercer tramo de precios rebajados es el más bajo, se podría tener la tentación de pedir 2.000 unidades o más, simplemente para aprovechar el menor coste del producto. Sin embargo, hacer pedidos por esas cantidades, aunque sea al menor de los precios rebajados, podría no reducir el coste total de inventario. Por supuesto que cuanto mayor es la cantidad del pedido, menor es el coste del producto debido a los descuentos. Sin embargo, los costes de almacenamiento aumentan porque los pedidos son mayores. Por tanto, cuando se consideran descuentos por cantidad, el principal equilibrio a conseguir es entre la *reducción del coste del producto* y el *incremento en el coste de almacenamiento*. Cuando se incluye el coste del producto, la ecuación para el coste total anual de inventario se puede calcular de la siguiente manera:

Coste total = Coste de preparación + Coste de almacenamiento + Coste del producto

o bien

$$CT = \frac{D}{Q}S + \frac{QH}{2} + PD \qquad \textbf{(2.9)}$$

donde Q = Cantidad pedida
D = Demanda anual en unidades
S = Coste de pedido o de preparación por pedido o preparación
P = Precio por unidad
H = Coste de almacenamiento por unidad y año

Tabla 2.2 ■ Un plan de descuentos por cantidad de pedido

Código de descuento	Cantidad de pedido	Descuento (%)	Precio con descuento (*P*)
1	0 a 999	sin descuento	5,00$
2	1.000 a 1.999	4	4,80$
3	2.000 o más	5	4,75$

Ahora tenemos que determinar la cantidad que reduce al mínimo el coste total anual del inventario. Como hay varios tramos de descuentos, este proceso consta de cuatro pasos:

Primer paso: Para cada uno de los tramos de descuento, hay que calcular el valor del tamaño de pedido óptimo Q^* en ese tramo, utilizando la siguiente ecuación:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{IP}} \qquad \textbf{(2.10)}$$

Observe que los costes de almacenamiento son IP en vez de H. Como el precio del artículo es un factor a considerar en el coste anual de almacenamiento, no se puede suponer que el coste de almacenamiento es una constante cuando el precio por unidad cambia para cada descuento por cantidad de pedido. Por lo tanto, es frecuente expresar el coste de almacenamiento (I) como un porcentaje del precio unitario (P) en vez de como un coste constante por unidad y por año, H.

No olvide ajustar la cantidad del pedido hacia arriba si la cantidad es demasiado pequeña para conseguir un descuento.

Segundo paso: Para cualquier descuento, si la cantidad económica de pedido calculada es demasiado baja para conseguir el descuento, hay que ajustar la cantidad de pedido aumentándola hasta llegar a la menor cantidad que permitirá obtener el descuento. Por ejemplo, si Q^* para el segundo tramo de descuentos en la Tabla 2.2 fuera de 500 unidades, se ajustaría este valor hasta 1.000 unidades. Fijémonos en el segundo tramo de descuento de la Tabla 2.2. Las cantidades de pedido entre 1.000 y 1.999 consiguen un descuento del 4 por ciento. Por lo tanto, si Q^* está por debajo de 1.000 unidades, ajustaremos la cantidad de pedido hasta 1.000 unidades.

El razonamiento empleado en el paso 2 puede no ser obvio. Si la cantidad de pedido Q^* está por debajo del intervalo que permitirá un descuento, una cantidad en este intervalo puede tener aún como resultado el coste total más bajo.

Como se muestra en la Figura 2.7, la curva del coste total se descompone en tres curvas de coste total diferentes. Hay una curva para el primer tramo ($0 \leq Q \leq 999$), para el segundo ($1.000 \leq Q \leq 1.999$) y para el tercer tramo de descuento ($2.000 \leq Q$). Fijémonos en la curva de coste total (CT) en el segundo tramo de descuento. La Q^*, para el precio correspondiente a este descuento, es más pequeña que la menor cantidad del intervalo que permite disfrutar del descuento, que va de 1.000 a 1.999 unidades. Como muestra la figura, la menor cantidad permitida en este

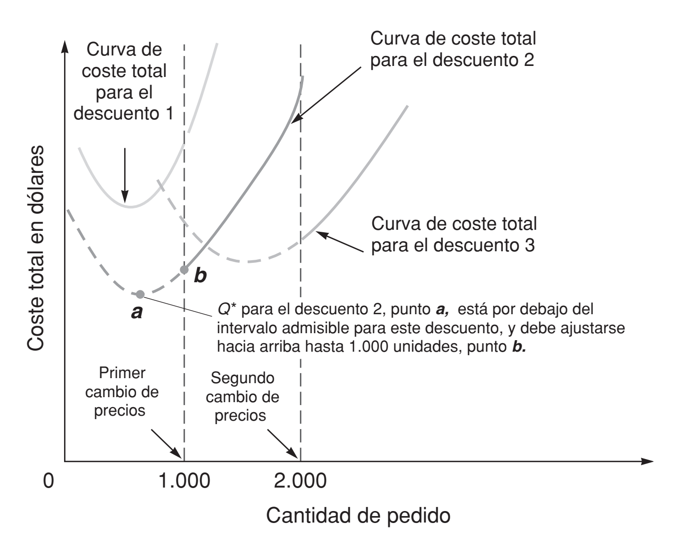


FIGURA 2.7 ■ Curva de coste total para el modelo de descuento por cantidad

intervalo, es decir, 1.000 unidades, es la cantidad que minimiza el coste total. Por lo tanto, es necesario el segundo paso para asegurar que no descartamos una cantidad de pedido que puede, de hecho, producir el coste mínimo. Observe que una cantidad de pedido, calculada en el paso 1, que sea *superior* a la cantidad mayor del intervalo que le calificaría para un descuento, debe descartarse.

Tercer paso: Utilizando la ecuación anterior del coste total, se calcula el coste total para cada uno de los valores de Q^* obtenidos en el primero y segundo paso. Si ha tenido que ajustar Q^* hacia arriba porque estaba por debajo del límite mínimo para acceder a un descuento, asegúrese de que utiliza el valor ajustado de Q^*.

Cuarto paso: Seleccione la Q^* que tiene el menor coste total de los calculados en el tercer paso. Ésta será la cantidad que minimizará el coste total de inventario.

Veamos cómo se puede aplicar este procedimiento con un ejemplo.

EJEMPLO 9

Modelo de descuento por volumen

Wohl's Discount Store almacena coches de carreras de juguete. Recientemente, se le ha ofrecido un programa de descuentos por cantidad para estos juguetes. Este plan de descuentos se mostró en la Tabla 2.2. Así, el precio normal del coche de carreras de juguete que se le ofrece es de 5,00 dólares. Para pedidos entre 1.000 y 1.999 unidades, el precio unitario se reduce hasta 4,80 dólares; para pedidos de 2.000 o más, el precio unitario es de sólo 4,75 dólares. Además, el coste de lanzamiento de un pedido es de 49,00 dólares; la demanda anual es de 5.000 coches de carreras, y el coste de almacenamiento, expresado como porcentaje del precio, *I*, es de un 20 por ciento, o 0,2. ¿Qué cantidad de pedido minimizará el coste total del inventario?



Archivo de datos de Excel OM Ch12Ex1.xla

El primer paso consiste en calcular Q^* para cada uno de los tramos de descuento de la Tabla 2.2. Esto se hace de la siguiente manera:

$$Q_1^* = \sqrt{\frac{2(5.000)(49)}{(0,2)(5,00)}} = 700 \text{ coches por pedido}$$

$$Q_2^* = \sqrt{\frac{2(5.000)(49)}{(0,2)(4,80)}} = 714 \text{ coches por pedido}$$

$$Q_3^* = \sqrt{\frac{2(5.000)(49)}{(0,2)(4,75)}} = 718 \text{ coches por pedido}$$

El segundo paso consiste en ajustar hacia arriba los valores de Q^* que están por debajo del intervalo permitido para el descuento. Como Q_1^* está entre 0 y 999, no es preciso ajustarlo. Como Q_2^* está por debajo del rango permitido de descuento de 1.000 a 1.999 unidades, hay que ajustarlo hasta 1.000 unidades. Lo mismo para Q_3^*, que debe ajustarse hasta 2.000 unidades. Después de este paso, las siguientes cantidades de pedido deben sustituirse en la ecuación de coste total (2.9):

$$Q_1^* = 700$$

$$Q_2^* = 1.000 \text{ (ajustado)}$$

$$Q_3^* = 2.000 \text{ (ajustado)}$$

El tercer paso, tal como hemos dicho antes, consiste en utilizar la ecuación del coste total para calcular dicho coste para cada cantidad de pedido. Este paso se realiza con ayuda de la Tabla 2.3, que presenta los cálculos para cada uno de los descuentos de la Tabla 2.2.

Tabla 2.3 ■ Cálculos del coste total para Wohl's Discount Store

Código de descuento	Precio unitario	Cantidad de pedido	Coste anual del producto	Coste anual de lanzamiento	Coste anual de almacenamiento	Total
1	5,00$	700	25.000$	350$	350$	25.700$
2	4,80$	1.000	24.000$	245$	480$	24.725$
3	4,75$	2.000	23.750$	122,50$	950$	24.822,50$

El cuarto paso consiste en seleccionar la cantidad de pedido que da el coste anual más bajo. A la vista de la Tabla 2.3, se puede decir que una cantidad de pedido de 1.000 coches de juguete minimizará el coste total. No obstante, puede observar que el coste total correspondiente a un pedido de 2.000 unidades es sólo ligeramente mayor que el correspondiente a un pedido de 1.000 unidades. Por tanto, si se consigue reducir el precio unitario del tercer descuento a 4,65 dólares, por ejemplo, entonces esta cantidad de pedido podría ser la que minimizaría el coste total de inventario.

MODELOS PROBABILÍSTICOS Y STOCK DE SEGURIDAD

Todos los modelos de inventario que hemos visto hasta ahora parten del supuesto de que la demanda de un producto es constante y conocida. Ahora vamos a relajar este supuesto. Los modelos de inventario siguientes son aplicables cuando la demanda de un producto es

desconocida pero puede definirse mediante una distribución de probabilidad. Este tipo de modelos se llaman **modelos probabilísticos**.

Una importante preocupación de todo directivo es mantener un nivel de servicio adecuado ante una demanda incierta. El **nivel de servicio** es el *complementario* de la probabilidad de una rotura de stock. Por ejemplo, si la probabilidad de rotura de stock es del 0,05, el nivel de servicio es (1 − 0,05), es decir 0,95. La incertidumbre de la demanda aumenta la posibilidad de rotura de stock. Un método para reducir la posibilidad de roturas de stock es mantener unidades extras en el inventario. Como ya dijimos, este inventario suele llamarse stock de seguridad. Consiste en añadir un cierto número de unidades al inventario para hacer frente a contingencias no previstas, unidades que aumentarán el valor del punto de pedido. Como recordará de secciones anteriores:

Modelo probabilístico
Modelo estadístico aplicable cuando la demanda de un producto, o cualquier otra variable, no es conocida pero puede especificarse por medio de una distribución de probabilidad.

Nivel de servicio
Valor complementario de la probabilidad de rotura: (1 – probabilidad de rotura).

$$\text{Punto de emisión del pedido} = \text{PP} = d \times L$$

donde d = Demanda diaria
L = Plazo de entrega, o número de días laborables que tardan en servir un pedido

La inclusión de existencias de seguridad (*ss*) cambia la expresión de la siguiente forma:

$$\text{PP} = d \times L + ss \qquad \textbf{(2.11)}$$

El nivel de stock de seguridad mantenido depende del coste de rotura y del coste de mantener un inventario adicional. El coste anual de rotura de stock se calcula de la siguiente forma:

Coste anual de rotura de stock = La suma de las unidades que faltan × La probabilidad × El coste de rotura/unidad × El número anual de pedidos **(2.12)**

El Ejemplo 10 ilustra este concepto.

EJEMPLO 10

Cálculo del stock de seguridad con demanda probabilística y tiempo de entrega constante

La óptica David Rivera ha determinado que su punto de pedido de monturas de gafas es de 50 ($d \times L$) unidades. El coste de almacenamiento por montura y año es de 5 dólares, y el coste de rotura de stock (o de pérdida de venta) es de 40 dólares por montura. La demanda de estas monturas en la tienda durante el plazo de aprovisionamiento ha tenido la siguiente distribución de probabilidad. El número óptimo de pedidos por año es de seis.

	Número de unidades	Probabilidad
	30	0,2
	40	0,2
PP →	50	0,3
	60	0,2
	70	0,1
		1,0

¿Qué stock de seguridad debe tener la óptica David Rivera?

Solución

El objetivo es encontrar el nivel de stock de seguridad que minimiza la suma de los costes de almacenamiento y los costes de rotura. El coste anual de almacenamiento es simplemente el coste de almacenamiento por unidad multiplicado por las unidades añadidas al PP. Por ejemplo, un stock de seguridad de 20 monturas de gafas, que implica un nuevo PP, con el stock de seguridad incluido, de 70 (= 50 + 20), aumenta el coste anual de almacenamiento en 5$(20) = 100$.

Sin embargo, es más difícil de calcular el coste anual de rotura de existencias. Para cualquier nivel de stock de seguridad, este coste es el coste en el que se espera incurrir en el caso de que se agote el inventario. Podemos calcularlo, como en la Ecuación (2.12), multiplicando el número de monturas que faltan por la probabilidad de demanda a ese nivel, por el coste de rotura, y por el número de veces por año en que se puede producir una rotura de stock (lo que, en nuestro caso, es el número de pedidos por año). Entonces sumamos los costes de rotura de inventario para cada nivel posible de rotura, con un PP determinado. Con un stock de seguridad de 0 unidades, por ejemplo, faltarán 10 monturas de gafas si la demanda durante el plazo de entrega es de 60, y 20 unidades si la demanda es de 70. Por tanto, el coste de rotura para un stock de seguridad de 0 unidades es:

(rotura de 10 monturas) (0,2) (40$ por cada rotura) (seis posibilidades de rotura al año) + (faltan 20 monturas) (0,1) (40$) (6) = 960 dólares

Stock de seguridad	Coste adicional de almacenamiento	Coste de rotura	Coste total
20	(20) (5$) = 100$	0$	100$
10	(10) (5$) = 50$	(10) (0,1) (40$) (6) = 240$	290$
0	0$	(10) (0,2) (40$) (6) + (20) (0,1) (40$) (6) = 960$	960$

El stock de seguridad que da un coste total más bajo es de 20 monturas. Por tanto, este stock de seguridad cambia el punto de pedido a 50 + 20 = 70 monturas de gafas.

Cuando es difícil, o incluso imposible, determinar el coste de rotura de stock, un directivo puede decidir seguir una política de mantener disponible suficiente stock de seguridad para cumplir con un nivel de servicio al cliente preestablecido. Por ejemplo, la Figura 2.8 muestra la utilización del stock de seguridad cuando la demanda (de kits de reanimación hospitalaria) es probabilística. Vemos que el stock de seguridad en la Figura 2.8 es 16,5 unidades, y que el punto de pedido aumenta también en 16,5.

El director puede querer definir el nivel de servicio como la satisfacción del 95 por ciento de la demanda (o a la inversa, teniendo roturas de stock sólo un 5 por ciento del tiempo). Suponiendo que la demanda durante el plazo de aprovisionamiento (el plazo de entrega del proveedor) sigue una curva normal, sólo se necesita la media y la desviación estándar de la distribución normal para definir las necesidades de inventario para cualquier nivel de servicio establecido. Los datos de ventas suelen ser adecuados para calcular la media y la desviación estándar. En el siguiente ejemplo utilizamos una curva normal con media (μ) y desviación estándar (σ) conocidas para determinar el punto de pedido y el stock de seguridad necesarios para un nivel de servicio del 95 por ciento. Se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{PP} = \text{demanda esperada durante el plazo de aprovisionamiento} + Z\sigma_{dLT} \qquad \textbf{(2.13)}$$

donde Z = Número de desviaciones estándar

σ_{dLT} = Desviación estándar de la demanda en el plazo de aprovisionamiento

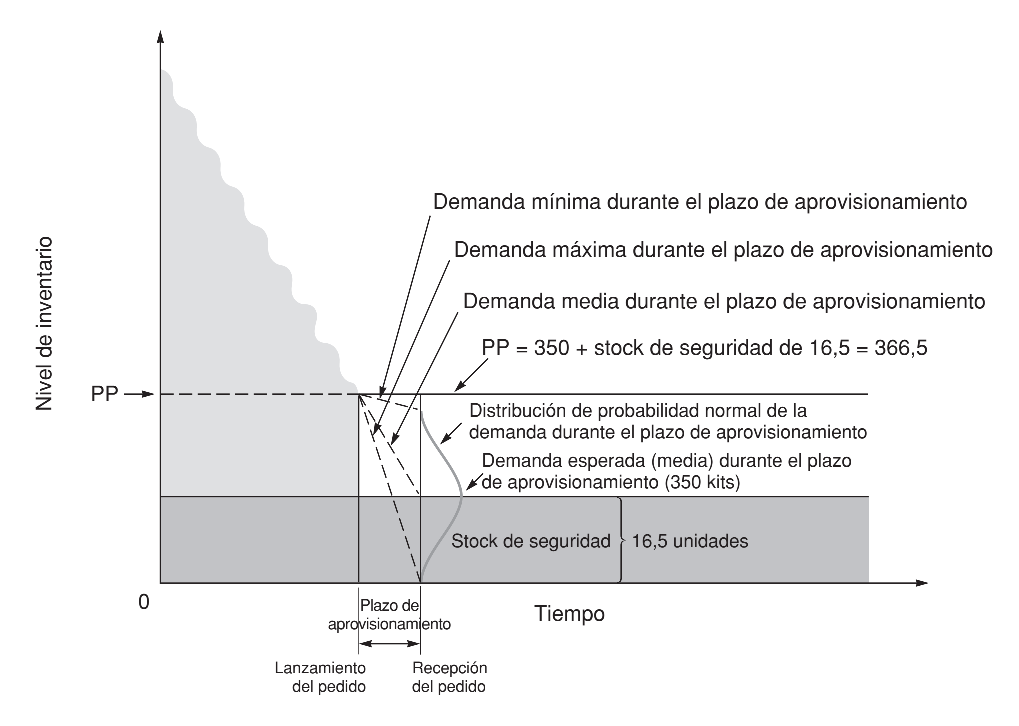


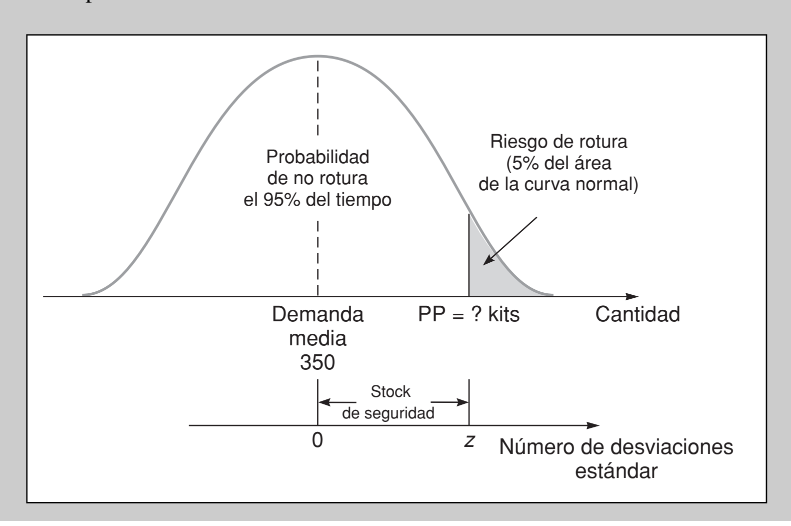
FIGURA 2.8 ■ Demanda probabilística de un artículo de hospital

El número esperado (medio) de kits necesarios durante el plazo de aprovisionamiento es de 350, pero para un nivel de servicio del 95 por ciento, el punto de pedido debería aumentar hasta 366,5.

EJEMPLO 11

Stock de seguridad con demanda probabilística

El hospital regional de Memphis mantiene en stock un kit de reanimación "código azul" que tiene una demanda distribuida normalmente durante el periodo de reaprovisionamiento. La demanda media durante este periodo es de 350 kits, y la desviación estándar es de 10 kits. El administrador del hospital quiere seguir una política de la que resulte que las roturas de stock ocurran solamente un 5 por ciento de las veces.



El coste de una política de inventarios aumenta de manera espectacular (exponencialmente) al producirse un aumento de los niveles de servicio.

(a) ¿Cuál es el valor adecuado de Z? (b) ¿Qué stock de seguridad debe mantener el hospital? (c) ¿Qué punto de pedido debe emplearse? La figura anterior puede ayudarle a visualizar el ejemplo:

μ = Demanda mediana = 350 kits
σ_{dLT} = Desviación estándar = 10 unidades
Z = Número de desviaciones estándar

Solución

a) Utilizamos las propiedades de una curva normal estandarizada para obtener un valor de Z para un área bajo la curva normal de 0,95 (o 1 + 0,05). A partir de una tabla de la distribución normal (véase el Apéndice I), encontramos un valor de Z de 1,65 desviaciones estándar de la media.

b) $$\text{Stock de seguridad} = x - \mu$$

Porque $$Z = \frac{x - \mu}{\sigma_{\text{dLT}}}$$

Por tanto, $$\text{Stock de seguridad} = Z\sigma_{\text{dLT}} \quad \textbf{(2.14)}$$

Resolviendo para el stock de seguridad, como en la Ecuación (2.14), tenemos:

$$\text{Stock de seguridad} = 1{,}65\ (10) = 16{,}5 \text{ kits}$$

Ésta es la situación que se muestra en la Figura 2.8.

c) El punto de pedido es

PP = Demanda esperada durante el plazo de aprovisionamiento + Stock de seguridad
= 350 kits + 16,5 kits de stock de seguridad = 366,5 o 366 kits

Otros modelos probabilísticos

Las Ecuaciones (2.13) y (2.14) suponen que tanto la estimación de la demanda esperada durante el plazo de aprovisionamiento como su desviación estándar son conocidas. Cuando *no* se dispone de los datos sobre la demanda durante el plazo de entrega, no se pueden aplicar estas fórmulas. Sin embargo, existen otros tres modelos disponibles. Tenemos que determinar qué modelo utilizar para las tres siguientes situaciones:

1. La demanda es variable y el plazo de aprovisionamiento es constante.
2. El plazo de aprovisionamiento es variable y la demanda es constante.
3. Tanto la demanda como el plazo de aprovisionamiento son variables.

Los tres modelos suponen que la demanda y el tiempo de entrega son variables independientes. Observe que nuestros ejemplos utilizan días, pero también se pueden utilizar semanas. Vamos a analizar cada una de estas tres situaciones por separado, porque hay que aplicar una fórmula diferente en cada una de ellas para calcular el PP.

La demanda es variable y el tiempo de entrega es constante Si *sólo la demanda* es variable, entonces

$$\text{PP} = \text{Demanda } \textit{media} \text{ diaria} \times \text{Plazo de aprovisionamiento en días} + Z\sigma_{dLT} \qquad \textbf{(2.15)}$$

donde σ_{dLT} = Desviación estándar de la demanda durante el plazo de entrega

$= \sigma_d \sqrt{\text{Plazo de aprovisionamiento}}$

y σ_d = Desviación estándar de la demanda diaria

EJEMPLO 12

PP para una demanda variable y un plazo de aprovisionamiento constante

La demanda diaria *media* de los iPods de Apple en una tienda de Ciudad Circuito es de 15 unidades, con una desviación estándar de 5 unidades. El plazo de entrega es constante e igual a 2 días. Determine el punto de pedido si la dirección quiere tener un nivel de servicio del 90 por ciento (es decir, un riesgo de rotura de sólo el 10 por ciento del tiempo). ¿Qué cantidad de este stock es stock de seguridad?

Solución

Demanda diaria media (distribución normal) = 15
Tiempo de entrega en días (constante) = 2
Desviación estándar de la demanda diaria = σ_d = 5
Nivel del servicio = 90%

A partir de la tabla normal (Apéndice I), encontramos un valor de Z de 1,28 para el 90 por ciento. Entonces, a partir de la Ecuación 2.15,

$$\begin{aligned} \text{PP} &= (15 \text{ unidades} \times 2 \text{ días}) + Z\sigma_d \sqrt{\text{Tiempo de entrega}} \\ &= 30 + 1{,}28(5)(\sqrt{2}) \\ &= 30 + 1{,}28(5)(1{,}41) = 30 + 9{,}02 = 39{,}02 \cong 39 \end{aligned}$$

Así pues, el stock de seguridad es de 9 iPods.

El plazo de aprovisionamiento es variable y la demanda es constante Si *sólo* es variable *el plazo de aprovisionamiento*, entonces

$$\text{PP} = (\text{Demanda diaria} \times \text{Plazo de aprovisionamiento } \textit{medio} \text{ en días}) = Z\,(\text{Demanda diaria}) \times \sigma_{LT} \qquad \textbf{(2.16)}$$

donde σ_{LT} = Desviación estándar del plazo de entrega en días

EJEMPLO 13

PP para una demanda constante y un plazo de aprovisionamiento variable

La tienda de Ciudad Circuito del Ejemplo 12 vende unas 10 cámaras digitales al día (casi una cantidad constante). El plazo de entrega de las cámaras sigue una distribución normal con un plazo medio de 6 días y una desviación estándar de 3 días. Se quiere un nivel de servicio del 98 por ciento. Calcule el PP.

Solución

Demanda diaria = 10
Plazo de entrega medio = 6 días
Desviación estándar del plazo de entrega = σ_{LT} = 3 días
Nivel del servicio = 98%, por lo que Z (del Apéndice I) = 2,055

De la Ecuación (2.16),

$$\begin{aligned} PP &= (10 \text{ unidades} \times 6 \text{ días}) + 2{,}055(10 \text{ unidades})(3) \\ &= 60 + 61{,}65 = 121{,}65 \end{aligned}$$

El punto de pedido es de unas 122 cámaras. Observe cómo un nivel de servicio elevado del 98 por ciento incrementa el PP. Si se aplica un nivel de servicio del 90 por ciento, como en el Ejemplo 12, el PP disminuye hasta

PP = 60 + (1,28)(10)(3) = 60 + 38,4 = 98,4, ya que el valor Z es sólo de 1,28.

Tanto la demanda como el tiempo de entrega son variables Cuando tanto la demanda como el plazo de entrega son variables, la fórmula del punto de pedido se hace más compleja[6].

$$PP = (\text{Demanda diaria media} \times \text{Plazo de entrega medio}) + Z\sigma_{dLT} \qquad \textbf{(2.17)}$$

donde σ_d = Desviación estándar de la demanda diaria

σ_{LT} = Desviación estándar del plazo de entrega en días

y $\sigma_{dLT} = \sqrt{(\text{Plazo de entrega medio} \times \sigma_d^2) + (\text{Demanda diaria media})^2\, \sigma_{LT}^2}$

EJEMPLO 14

PP para una demanda y un tiempo de entrega variables

El artículo que más se vende en la tienda de Ciudad Circuito son los paquetes de seis pilas de 9 voltios. Se venden unos 150 al día, siguiendo una distribución normal con una desviación estándar de 16. Las pilas se piden a un distribuidor de otro Estado; el plazo de entrega sigue una distribución normal con una media de 5 días y una desviación estándar de 1 día. Para mantener un nivel de servicio del 95 por ciento, ¿qué PP es necesario?

Solución

Demanda diaria media = 150 paquetes
Desviación estándar de la demanda = σ_d = 16 paquetes
Plazo de entrega medio = 5 días
Desviación estándar del plazo de entrega = σ_{LT} = 1 día
Nivel del servicio = 95%, por lo que Z (del Apéndice I) = 1,65

[6] *Véase* S. Narasimhan, D. W. McLeavey y P. Billington, *Production Planning and Inventory Control,* 2.ª edición (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1995), Capítulo 6, para ver los detalles. Observe que la Ecuación (2.17) también se puede expresar como

$$PP = \text{Demanda diaria media} \times \text{Plazo de entrega medio} + Z\sqrt{\text{Plazo de entrega medio} \times \sigma_d^2 + \bar{d}^2\sigma_{LT}^2}$$

De la Ecuación (2.17),

$$PP = (150 \text{ paquetes} \times 5 \text{ días}) + 1{,}65\ \sigma_{dLT}$$

donde

$$\sigma_{dLT} = \sqrt{(5 \text{ días} \times 16^2) + (150^2 \times 1^2)}$$

$$= \sqrt{(5 \times 256) + (22.500 \times 1)}$$

$$= \sqrt{(1.280 + 22.500)} = \sqrt{23.780} \cong 154$$

Por lo que

$$PP = (150 \times 5) + 1{,}65(154) \cong 750 + 254 = 1.004 \text{ paquetes}$$

SISTEMAS DE PERIODO FIJO (P)

Los modelos de inventario que hemos considerado hasta ahora son **sistemas de cantidad fija** o **sistemas Q**. Es decir, se añade siempre la misma cantidad fija al inventario cada vez que se hace un pedido de un artículo. Vimos que los pedidos son desencadenados por determinados acontecimientos. Cuando el inventario disminuye hasta alcanzar el punto de pedido (PP), se lanza un nuevo pedido de Q unidades.

Para utilizar el modelo de cantidad fija, hay que hacer un seguimiento continuo del inventario. Es lo que se denomina **sistema de inventario perpetuo**. Cada vez que se añade o retira un artículo del inventario, se actualizan los registros para asegurarse de que no se ha alcanzado el PP.

En un **sistema de periodo fijo,** o **sistema P**, sin embargo, se lanzan los pedidos al final de un determinado periodo. En ese momento, y sólo entonces, se recuenta el inventario. Sólo se pide la cantidad necesaria para llevar el inventario hasta un nivel de stock prefijado. La Figura 2.9 ilustra este concepto.

Los sistemas de periodo fijo tienen varios de los supuestos del sistema básico de cantidad fija EOQ:

- Los únicos costes relevantes son los costes de lanzamiento y de almacenamiento.
- Los tiempos de entrega son conocidos y constantes.
- Los artículos son independientes entre sí.

Sistema de cantidad fija (Q)
Sistema de pedidos EOQ en el que siempre se pide la misma cantidad.

Sistema de inventario perpetuo
Sistema que hace un seguimiento continuo de cada retirada e incorporación de artículos al inventario, de forma que los registros siempre están actualizados.

Sistema de periodo fijo (P)
Sistema en el que los pedidos se realizan a intervalos de tiempo regulares.

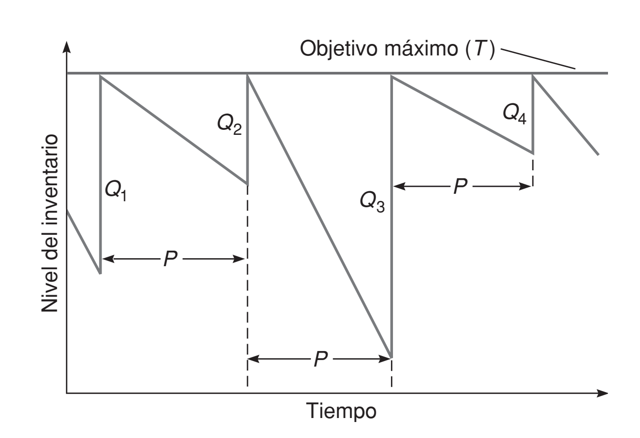


FIGURA 2.9 ■ La curva del punto de pedido (PP)

Se piden diferentes cantidades (Q1, Q2, Q3, etcétera) a intervalos regulares (P) en función de la cantidad necesaria para llevar el inventario hasta el nivel máximo objetivo (T) de stock.

DIRECCIÓN DE MARKETING EN ACCIÓN

66.207.8976 BOTELLAS DE CERVEZA EN LA PARED

Cuando Dereck Gurden para en una de las tiendas de sus clientes, 7-Eleven, Buy N Save, o una de las docenas de bodegas y restaurantes del territorio que recorre, territorio de 2.000 kilómetros cuadrados en el Valle Central de California, los directores de las tiendas suelen dejar lo que están haciendo y toman un bloc de notas. Esto se debe a que, según reivindica Gurden, "Sé más de su negocio que ellos mismos, al menos en lo que respecta a la cerveza".

¿Qué es lo que hace que Gurden y otros representantes de ventas de los distribuidores de Anheuser-Busch sepan tanto? Es BudNet, la secreta joya de la corona del Rey de la Cerveza: una red de datos que abarca a todo Estados Unidos y a través de la cual, los conductores y los vendedores informan, con un nivel de detalle asombroso, sobre ventas, espacio en los estantes, inventarios y escaparates en miles de tiendas. ¿Cómo funciona? A medida que Gurden recorre una tienda introduce lo que ve en su pequeña computadora portátil, después lo conecta a un teléfono móvil y lanza nuevos pedidos, junto con las informaciones que ha recopilado. Anheuser ha elaborado una ciencia tremendamente exacta para averiguar qué están comprando los amantes de la cerveza, así como dónde y por qué.

Comparando estos datos con las cifras del censo estadounidense de los barrios, Anheuser explota los datos hasta el nivel de ventas en cada tienda concreta. La empresa puede precisar exactamente la edad, procedencia étnica, nivel de educación, adscripción política y orientación sexual de los consumidores del 7-Eleven de cualquier barrio. BudNet es la principal razón de que la cuota de mercado de 75.000 millones de dólares que Anheuser tiene en el mercado de la cerveza estadounidense siga creciendo, y que la empresa haya publicado un incremento de beneficios de dos dígitos durante 20 trimestres consecutivos, mientras que sus competidores tienen un crecimiento estancado.

Fuentes: Business 2.0 (enero/febrero 2001): 47-49; *Beverage Industry* (mayo de 2004); y *The Wall Street Journal* (23 de marzo de 2004): C3.

EJEMPLO 15

Pidiendo con el sistema P

El restaurante Hard Rock de Londres tiene un pedido pendiente de servir a un cliente (*backorder*) de 3 chaquetas de cuero de aviador para su tienda. No hay chaquetas en existencias, ni se espera recibir ninguna de pedidos anteriores al proveedor, y ha llegado el momento de hacer un pedido. El valor de stock objetivo es 50 chaquetas. ¿Cuántas chaquetas de aviador hay que pedir?

Solución

Cantidad del pedido (Q) = Objetivo (T) − Inventario disponible − Pedidos anteriores pendientes de recibir del proveedor + Pedidos pendientes de servir a clientes (*backorder*) = 50 − 0 − 0 + 3 = 53 chaquetas

La recta de pendiente negativa de la Figura 2.9 representa, de nuevo, el inventario disponible. Pero ahora, cuando pasa el tiempo entre pedidos (P), hacemos un pedido para volver a llevar el inventario hasta el valor objetivo (T). La cantidad que se pide durante el primer periodo debe ser Q_1, en el segundo periodo será Q_2, etcétera. El valor Q_i es la diferencia entre el nivel de inventario que se quiere tener (objetivo) y el inventario disponible actual. El Ejemplo 15 muestra cuánto se tiene que pedir en un sistema P simple.

La ventaja del sistema de periodo fijo es que no hay recuentos físicos de los artículos del inventario después de retirar un artículo: sólo se produce cuando llega el momento de la siguiente revisión. Este procedimiento también resulta conveniente desde el punto de vista administrativo, especialmente si el control del inventario es sólo una de las muchas tareas que realiza un empleado.

Los sistemas de periodo fijo son adecuados cuando los vendedores hacen visitas rutinarias (es decir, a intervalos fijos) a sus clientes para conseguir nuevos pedidos o cuando los compradores quieren combinar pedidos para ahorrar costes de lanzamiento y de transporte (por lo tanto, tendrán el mismo periodo de revisión para artículos similares de su inventario). Por ejemplo, una compañía de máquinas expendedoras puede ir a rellenar sus máquinas cada martes. Ésta es también la situación de los representantes comerciales de Anheuser-Busch, que deben visitar a las tiendas cada cinco días.

La desventaja del sistema *P* es que, como no hay recuento del inventario durante el periodo, existe la posibilidad de rotura durante ese tiempo. Esta situación puede producirse si una venta importante reduce a cero el stock inmediatamente después de haberse lanzado un pedido. Por eso, hay que mantener un nivel de stock de seguridad mayor (en comparación con el correspondiente a los sistemas de cantidad fija) para proporcionar protección contra la rotura, tanto durante el tiempo entre revisiones como durante el plazo de aprovisionamiento.

RESUMEN

El inventario representa una importante inversión para muchas empresas. Esta inversión es muchas veces mayor de lo que debería porque a las empresas les resulta más fácil mantener un inventario "por si acaso" (*just in case*) en vez de un inventario "justo a tiempo" (*just in time*). Los inventarios son de cuatro tipos:

Inversión en inventario: el mayor activo de su empresa.

1. Materias primas y componentes comprados
2. Productos en curso (semielaborados)
3. Mantenimiento, reparación y operación (MRO)
4. Productos acabados.

En este capítulo hemos analizado el inventario independiente, el análisis ABC, la exactitud de los registros y los modelos de inventario utilizados para controlar la demanda independiente. El modelo EOQ, el modelo de cantidad de pedido en producción y el modelo de descuento por cantidad de pedido pueden resolverse mediante los programas Excel, Excel OM o el programa POM para Windows. La Tabla 2.4 presenta un resumen de los modelos de inventario analizados en este capítulo.

Tabla 2.4 ■ Resumen de los modelos de demanda independiente

Q = Número de artículos por pedido
EOQ = Cantidad óptima de pedido (Q^*)
D = Demanda anual en unidades
S = Coste de preparación o de lanzamiento de cada pedido
H = Coste de almacenamiento por unidad y año en dólares
p = Tasa de producción diaria
d = Tasa de demanda diaria
P = Precio
I = Coste anual de almacenamiento del inventario como porcentaje del precio
μ = Demanda media
σ_{dLT} = Desviación estándar de la demanda durante el plazo de aprovisionamiento (entrega)
σ_{LT} = Desviación estándar del plazo de aprovisionamiento (entrega)
Z = Valor estándar en la curva normal

EOQ:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Modelo EOQ de la cantidad de pedido en producción

$$Q_p^* = \sqrt{\frac{2DS}{H[1-(d/p)]}} \quad \textbf{(2.7)}$$

Coste total para el EOQ y para los modelos EOQ de descuento por cantidad:

CT = Coste total

= Coste de preparación + Coste de almacenamiento + Coste de producto

$$= \frac{D}{Q} S + \frac{Q}{2} H + PD \quad \textbf{(2.9)}$$

Modelo EOQ de descuento por cantidad:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{IP}} \quad \textbf{(2.10)}$$

Modelo probabilístico conociendo la demanda esperada durante el plazo de aprovisionamiento:

PP = Demanda esperada durante plazo de aprovisionamiento − $Z\sigma_{dLT}$ **(2.13)**

Stock de seguridad = $Z\sigma_{dLT}$ **(2.14)**

Modelo probabilístico con demanda variable y plazo de aprovisionamiento constante:

PP = (Demanda diaria media × Plazo de aprovisionamiento) − $Z\sigma_{dLT}$ **(2.15)**

Modelo probabilístico con demanda constante y plazo de aprovisionamiento variable:

PP = (Demanda diaria × Plazo de aprovisionamiento medio)
+ Z(Demanda diaria) σ_{LT} **(2.16)**

Modelo probabilístico con demanda y plazo de aprovisionamiento variables:

PP = (Demanda diaria media × Plazo de aprovisionamiento medio) + $Z\sigma_{dLT}$ **(2.17)**

TÉRMINOS CLAVE

Inventario de materias primas *(p. 57)*
Inventario de trabajos en curso (TEC) *(p. 57)*
MRO *(p. 58)*
Inventario de productos acabados *(p. 58)*
Análisis ABC *(p. 58)*
Recuento cíclico *(p. 61)*
Pérdidas *(p. 62)*
Hurtos *(p. 62)*
Coste de almacenamiento *(p. 63)*
Coste de lanzamiento *(p. 63)*
Coste de preparación *(p. 64)*
Tiempo de preparación *(p. 64)*
Cantidad económica de pedido (EOQ) *(p. 65)*
Robusto *(p. 69)*
Plazo de aprovisionamiento (de reaprovisionamiento o de entrega) *(p. 70)*
Punto de pedido (PP) *(p. 71)*
Stock de seguridad *(p. 71)*
Modelo de la cantidad de pedido en producción *(p. 72)*
Descuento por cantidad *(p. 74)*
Modelos probabilísticos *(p. 79)*
Nivel de servicio *(p. 79)*
Sistema de cantidad fija (Q) *(p. 85)*
Sistema de inventario perpetuo *(p. 85)*
Sistema de periodo fijo *(p. 85)*

UTILIZAR SOFTWARE PARA RESOLVER PROBLEMAS DE INVENTARIOS

Esta sección presenta tres formas de resolver los problemas de inventarios con programas informáticos. En primer lugar, puede crear sus propias hojas de cálculo Excel. En segundo lugar, puede utilizar el programa Excel OM que viene con el texto y que se encuentra en el CD-ROM del alumno. En tercer lugar, POM para Windows, también incluido en el CD, permite resolver los problemas marcados con una ***P***.

Creación de sus propias hojas de cálculo Excel

El Programa 2-1 muestra cómo puede hacer un modelo Excel para resolver el Ejemplo 8. Se trata de un modelo de cantidad de pedido en producción. Debajo del Programa 2.1 hay una lista de las fórmulas necesarias para crear la hoja de cálculo.

	A	B
1	Nathan Manufacturing, Inc.	
2		
3	Demand rate, D	1000
4	Setup cost, S	$ 10.00
5	Holding cost, H	$ 0.50
6	Daily production rate, p	8
7	Daily demand rate, d	4
8	Days per year	250
9	Unit price, P	$ 200.00
10		
11		
12	Optimal production quantity, Q*	282.84
13	Maximum Inventory	141.42
14	Average Inventory	70.71
15	Number of Setups	3.54
16	Time (days) between production runs	70.71
17		
18	Holding cost	$ 35.36
19	Setup cost	$ 35.36
20		
21	Unit costs	$ 200,000
22		
23	Total cost, Tc	$ 200,071
24		

PROGRAMA 2.1■ Utilización de Excel para un modelo de producción con los datos del Ejemplo 8

Cálculos

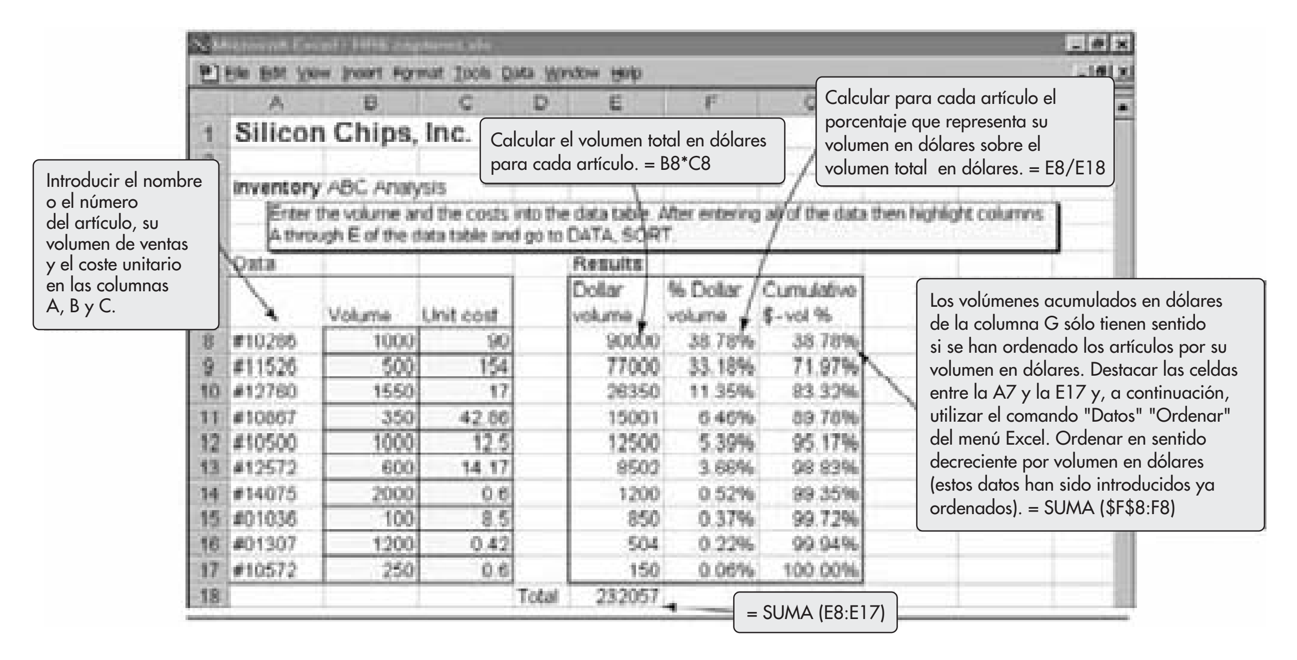
Valor	Celda	Fórmula Excel
Cantidad óptima de producción	B12	=SQRT(2*B3*B4/B5)*SQRT(B6/(B6-B7))
Inventario máximo	B13	=B12*(B6-B7)/B6
Inventario medio	B14	=B13/2
Número de preparaciones	B15	=B3/B12
Tiempo (días) entre tandas de producción	B16	=B8/B15
Coste de almacenamiento	B18	=B14*B5
Coste de preparación	B19	=B15*B4
Costes unitarios	B21	=B9*B3
Coste total	B22	=B18+B19+B21



Utilización de Excel OM

El programa Excel OM permite modelizar fácilmente los problemas de inventario, desde el análisis ABC hasta el modelo básico EOQ, el modelo de producción o las situaciones de descuento por cantidad.

El programa 2.2 muestra los datos introducidos, las fórmulas seleccionadas y los resultados para un análisis ABC, utilizando los datos del Ejemplo 1. Después de introducir los datos, utilizamos los comandos de Excel *Data* (datos) y *Sort* (ordenar) para ordenar los artículos de mayor a menor volumen en dólares.



	Volume	Unit cost		Dollar volume	% Dollar volume	Cumulative $-vol %
#10286	1000	90		90000	38.78%	38.78%
#11526	500	154		77000	33.18%	71.97%
#12760	1550	17		26350	11.35%	83.32%
#10867	350	42.86		15001	6.46%	89.78%
#10500	1000	12.5		12500	5.39%	95.17%
#12572	600	14.17		8502	3.66%	98.83%
#14075	2000	0.6		1200	0.52%	99.35%
#01036	100	8.5		850	0.37%	99.72%
#01307	1200	0.42		504	0.22%	99.94%
#10572	250	0.6		150	0.06%	100.00%
			Total	232057		

PROGRAMA 2.2 ■ Utilización de Excel OM para el análisis ABC con datos del Ejemplo 1



Utilizar POM para Windows

El módulo de inventarios de POM para Windows puede resolver toda la familia de problemas EOQ, así como gestión de inventarios ABC. Por favor, *véase* el Apéndice IV para más detalles.



PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto 2.1

Warren W. Fisher Computer Corporation compra 8.000 transistores cada año para utilizarlos como componentes en pequeños PC. El coste unitario de cada transistor es de 10 dólares y el coste de almacenamiento de un transistor durante un año es de 3 dólares. El coste de lanzamiento es de 30 dólares por pedido. ¿Cuál es (a) la cantidad óptima por pedido, (b) el número esperado de pedidos por año, y (c) el tiempo esperado entre pedidos? Suponga que Fisher trabaja durante 200 días al año.

Solución

a) $Q^* = \sqrt{\dfrac{2DS}{H}} = \sqrt{\dfrac{2(8.000)(30)}{3}} = 400 \text{ unidades}$

b) $N = \dfrac{D}{Q^*} = \dfrac{8.000}{400} = 20 \text{ pedidos}$

c) $\text{Tiempo entre pedidos} = T = \dfrac{\text{Número de días laborables}}{N} = \dfrac{200}{20} = 10 \text{ días laborables}$

Por lo tanto, se emite un pedido de 400 transistores cada 10 días. Se supone, por tanto, que se emiten 20 pedidos cada año.

Problema Resuelto 2.2

La demanda anual de carpetas para notas en la papelería de Salinas es de 10.000 unidades. Teresita Salinas abre su negocio 300 días al año y estima que su proveedor tarda normalmente 5 días en servir sus pedidos. Calcule el punto de pedido de las carpetas de notas.

Solución

$$L = 5 \text{ días}$$

$$d = \frac{10.000}{300} = 33{,}3 \text{ unidades por día}$$

$$\text{PP} = d \times L = (33{,}3 \text{ unidades por día})(5 \text{ días})$$

$$= 166{,}7 \text{ unidades}$$

Por tanto, Teresita debe lanzar un pedido cuando su stock alcanza las 167 unidades.

Problema Resuelto 2.3

La empresa Leonard Presby, Inc. tiene una tasa anual de demanda de 1.000 unidades pero puede producir a un ritmo medio de producción de 2.000 unidades. El coste de preparación es de 10 dólares; el de almacenamiento es de 1 dólar por unidad y año. ¿Cuál es el número óptimo de unidades que se debe producir cada vez?

Solución

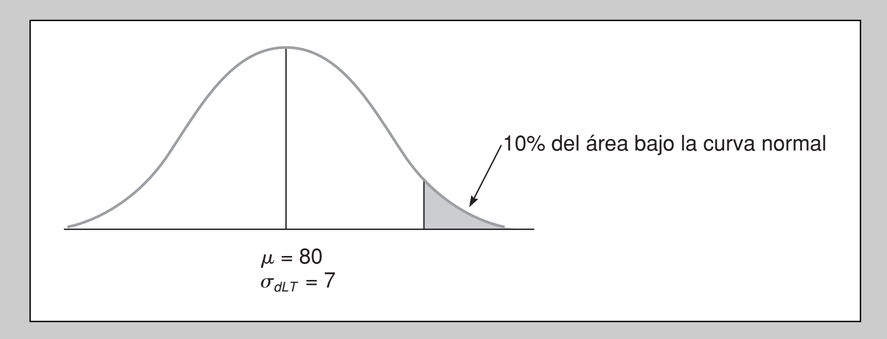
$$Q_p^* = \sqrt{\frac{2DS}{H\left(1 - \dfrac{\text{tasa de demanda anual}}{\text{tasa de producción anual}}\right)}} = \sqrt{\frac{2(1.000)(10)}{1[1 - (1.000/2.000)]}} =$$

$$= \sqrt{\frac{20.000}{1/2}} = 40.000 = 200 \text{ unidades}$$

Problema Resuelto 2.4

¿Qué stock de seguridad debe mantener la empresa de Ron Satterfield si las ventas medias durante el plazo de aprovisionamiento son de 80 unidades, la desviación estándar es 7 y Ron puede aceptar rotura de stock el 10 por ciento del tiempo?

Solución



Del Apéndice I, Z en un área de 0,9 (o $1 - 0{,}10$) $= 1{,}28$

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma_{dLT}} = \frac{ss}{\sigma_{dLT}}$$

$$\begin{aligned} ss &= Z\sigma_{dLT} \\ &= 1{,}28(7) = 8{,}96 \text{ unidades, o } 9 \text{ unidades} \end{aligned}$$

Problema Resuelto 2.5

La demanda diaria de televisores de plasma de 42 pulgadas en Sam's Discount Emporium sigue una distribución normal con una media de 5 y una desviación estándar de 2 unidades. El plazo para recibir un envío de nuevos televisores es de 10 días y es bastante constante. Calcule el punto de pedido y el stock de seguridad para un nivel de servicio del 95 por ciento.

Solución

El PP para este modelo de demanda variable y tiempo de entrega constante utiliza la Ecuación (2.15):

$$\text{PP} = (\text{Demanda diaria media} \times \text{Plazo de entrega en días}) + Z\sigma_{dLT}$$

donde $$\sigma_{dLT} = \sigma_d \sqrt{\text{Plazo de entrega}}$$

Así pues, con $Z = 1{,}65$,

$$\begin{aligned} \text{PP} &= (5 \times 10) + 1{,}65(2)\sqrt{10} \\ &= 50 + 10{,}4 = 60{,}4 \cong 60 \text{ TV} \end{aligned}$$

El stock de seguridad es de 10,4, o unos 10 televisores.

Problema Resuelto 2.6

La demanda del Hospital Arnold Palmer para un paquete quirúrgico muy especializado es de 60 paquetes por semana, prácticamente todas las semanas. El plazo de entrega de McKesson, el principal proveedor, sigue una distribución normal con una media de 6 semanas para este producto, y una desviación estándar de 2 semanas. Se quiere tener un nivel de servicio semanal del 90 por ciento. Calcule el PP.

Solución

Aquí, la demanda es constante y el plazo de entrega variable, con datos dados en semanas y no en días. Aplicamos la Ecuación (2.16):

$$PP = (\text{Demanda semanal} \times \text{Tiempo de entrega medio en semanas}) + Z(\text{Demanda semanal})\, \sigma_{LT}$$

donde σ_{LT} = desviación estándar del plazo de entrega en semanas = 2

Así pues, con $Z = 1{,}28$ para un nivel del servicio del 90 por ciento,

$$PP = (60 \times 6) + 1{,}28(60)(2)$$
$$= 360 + 153{,}6 = 513{,}6 \cong 514 \text{ paquetes quirúrgicos}$$

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestra página web o utilice el CD-ROM del estudiante para obtener ayuda sobre este capítulo.

En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Visita virtual a una empresa
- Problemas en Internet
- Casos de estudio en Internet

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Videoclip y caso de estudio en vídeo
- Ejercicios Active Model
- Excel OM
- Archivos de datos para ejemplos de Excel OM
- POM para Windows

CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. Describa los cuatro tipos de inventario.
2. Con la aparición de las computadoras de bajo coste, ¿ve alternativas a las tradicionales clasificaciones ABC?
3. ¿Para qué sirve el sistema de clasificación ABC?
4. Identifique y explique los tipos de costes considerados en un sistema de inventarios.
5. ¿Cuáles son las principales hipótesis del modelo EOQ?
6. ¿Qué relación hay entre la cantidad económica de pedido y la demanda? ¿Y con el coste de almacenamiento? ¿Y con el coste de preparación?
7. Explique por qué no es necesario incluir el coste del producto (precio o precio por cantidad) en el mode-

lo EOQ, pero sí hace falta esta información en el modelo de descuento por cantidad.

8. ¿Qué ventajas presenta el recuento cíclico?

9. ¿Qué efecto produce una reducción del tiempo de preparación en el EOQ?

10. Cuando se ofrecen descuentos por cantidad, ¿por qué no es necesario comprobar los puntos de descuento que están por debajo del EOQ o los puntos por encima del EOQ que no son puntos de descuento?

11. ¿Qué se quiere decir con *nivel de servicio*?

12. Explique la siguiente afirmación: Siendo todo lo demás igual, la cantidad de pedido en producción será mayor que la cantidad económica de pedido.

13. Describa la diferencia entre un sistema de inventario de cantidad fija (Q) y uno de periodo fijo (P).

14. Explique qué se quiere decir con la expresión "modelo robusto". Concretamente, ¿qué le diría a un directivo que exclamara: "Oh, oh, tenemos problemas. Nos hemos equivocado calculando el EOQ. La demanda real es un 10 por ciento mayor que la estimada"?

15. ¿Qué es el "stock de seguridad"? ¿Contra qué protege?

16. Cuando la demanda no es constante, ¿de qué cuatro parámetros depende el punto de pedido?

17. ¿Cómo se hace el seguimiento de los niveles de inventario en una tienda minorista?

18. Diga la gran ventaja, y la gran desventaja, de un sistema de periodo fijo (P).



DILEMA ÉTICO

El hospital de Wayne Hills en la pequeña población de Wayne, Nebraska, se enfrenta a un problema común tanto para los grandes hospitales urbanos como para los pequeños y remotos como éste. Se trata de decidir qué cantidad de plasma sanguíneo de cada grupo se debe mantener en stock. Como la sangre tiene un precio elevado y un periodo de conservación limitado antes de deteriorarse (hasta 5 semanas si se guarda refrigerada entre 1 y 6 ºC), el hospital de Wayne Hills quiere reducir el stock al mínimo posible. Desgraciadamente, accidentes que sucedieron en el pasado, como un tornado de gran intensidad y un descarrilamiento ferroviario, demostraron que, si no se mantiene un stock suficiente, se pierden vidas humanas cuando se producen acontecimientos que requieren grandes cantidades de plasma. El administrador del hospital quiere establecer un nivel de servicio del 85 por ciento basándose en la demanda de la última década. Comente las consecuencias de esta decisión. ¿Cuál es la responsabilidad de un hospital respecto al almacenamiento de medicinas con un plazo de vida tan corto? ¿Cómo fijaría usted el nivel de inventario para un artículo como el plasma sanguíneo?



EJERCICIO ACTIVE MODEL

Este ejercicio Active Model analiza las cuestiones básicas de una típica decisión sobre inventarios y la sensibilidad del modelo a las variaciones de la demanda y los costes. Utiliza datos de los Ejemplos 3, 4 y 5.

Preguntas

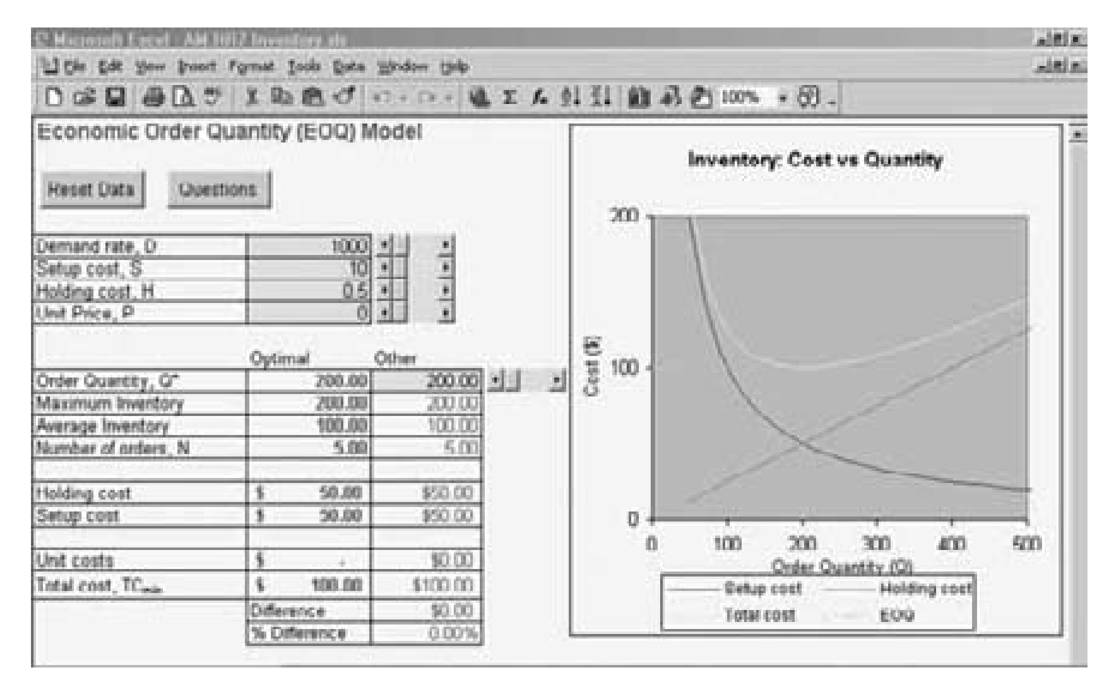
1. ¿Cuál es el EOQ y cuál es el menor coste total?

2. ¿Cuál es el coste anual de *almacenamiento* y el de *lanzamiento* en el EOQ de 200 unidades?

3. A partir del gráfico, ¿qué puede concluir sobre la relación entre el coste total mínimo y los costes de lanzamiento y de almacenamiento del inventario?

4. ¿Cuánto aumenta el coste total si el director de la tienda hace un pedido de 50 agujas hipodérmicas más de las que corresponden al EOQ?

5. ¿Qué ocurre con el EOQ y el coste total cuando se duplica la demanda? ¿Y cuando se duplica el coste de almacenamiento?



ACTIVE MODEL 2.1 ■ Un análisis EOQ de los datos de los Ejemplos 3,4 y 5 para Sharp, Inc.

6. Vaya disminuyendo los valores de los costes de preparación y describa los cambios del gráfico. ¿Qué ocurre con el EOQ?

7. Comente la sensibilidad del modelo EOQ ante errores en la estimación de la demanda y de los costes.



PROBLEMAS*

•  **2.1.** George Walker ha recopilado la siguiente tabla que presenta seis artículos en inventario junto con el coste unitario y la demanda anual en unidades:

Código de identificación	Coste unitario	Demanda anual en unidades
XX1	5,84$	1.200
B66	5,40	1.110
3CPO	1,12	896
33CP	74,54	1.104
R2D2	2,00	1.110
RMS	2,08	961

Utilizando un análisis ABC, ¿qué artículos hay que controlar cuidadosamente utilizando una técnica cuantitativa de gestión de inventarios y qué artículos no deben controlarse de cerca?

---

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; X significa que se puede resolver el problema con Excel OM; PX significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

• P **2.2.** La empresa Boreki tiene los diez artículos siguientes en inventario. Teodoro Boreki le pide a usted, reciente diplomado en dirección de operaciones, que divida estos artículos conforme a una clasificación ABC. ¿Qué informe le presentará?

Artículo	Demanda anual	Coste unitario
A2	3.000	50$
B8	4.000	12
C7	1.500	45
D1	6.000	10
E9	1.000	20
F3	500	500
G2	300	1.500
H2	600	20
I5	1.750	10
J8	2.500	5

• P **2.3.** McKenzie Services está considerando utilizar un análisis ABC para centrar su atención en sus artículos más importantes. Se ha tomado una muestra aleatoria de 20 artículos, y se ha calculado su consumo en dólares tal y como se muestra en la tabla. Ordene los artículos y asígnelos a una clase A, B o C. A partir de esta muestra, ¿cree que el análisis ABC ayudará a la dirección a identificar los pocos artículos significativos?

Artículo	Consumo en dólares	Artículo	Consumo en dólares
1	9.200$	11	300$
2	400	12	10.400
3	33.400	13	70.800
4	8.100	14	6.800
5	1.100	15	57.900
6	600	16	3.900
7	44.000	17	700
8	900	18	4.800
9	100	19	19.000
10	700	20	15.500

• **2.4.** Howard Electronics, una pequeña empresa fabricante de equipos de investigación electrónicos, tiene unos 7.000 artículos en su inventario y ha contratado a Joan Blasco-Paul para que lo gestione. Joan ha decidido que el 10 por ciento de los artículos del inventario son de la categoría A, el 35 por ciento son de la categoría B y el 55 por ciento de la C. Ella querría establecer un sistema en el que todos los artículos de la categoría A se contasen todos los meses (cada 20 días laborables), todos los artículos de la categoría B trimestralmente (cada 60 días laborables), y los de la categoría C cada seis meses (cada 120 días laborables). ¿Cuántos artículos habrá que contar cada día?

• P **2.5.** El centro de formación en informática de William Beville, en Richmond, almacena libros de texto con las siguientes características:

Demanda $D = 19.500$ unidades/año
Coste de lanzamiento $S = 25\$$/pedido
Coste de almacenamiento $H = 4\$$/unidad/año

a) Calcule el EOQ de los libros.
b) ¿Cuál es el coste de almacenamiento anual de los libros?
c) ¿Cuál es el coste anual de lanzamiento de pedidos?

• **2.6.** Si $D = 8.000$ al mes, $S = 45$ dólares por pedido y $H = 2$ dólares por unidad y mes, ¿cuál es la cantidad económica de pedido?

: **2.7.** El bufete de abogados de Henry Crouch ha encargado tradicionalmente 60 cartuchos de tinta en cada pedido. La empresa estima que el coste de almacenamiento es del 40 por ciento del coste unitario de 10 dólares, y que la demanda anual es de unas 240 unidades al año. Se cree que se cumplen los supuestos del modelo básico EOQ. ¿Para qué valor del coste de lanzamiento de pedido será óptima esta acción?

• **2.8.** "La tienda de los sueños" de Madeline Thimmes vende camas de agua y sus diferentes accesorios. Su modelo de cama más vendido tiene una demanda anual de 400 unidades. El coste por pedido es de 40 dólares; el coste de almacenamiento es de 5 dólares por unidad y año.

a) Para minimizar el coste total, ¿cuántas unidades deben encargarse cada vez que se emite un pedido?
b) Si los costes de almacenamiento por unidad fueran de 6 dólares en vez de 5, ¿cuál sería la cantidad óptima por cada pedido?

• **2.9.** Southeastern Bell almacena determinado conmutador en su almacén central para suministrarlo a las oficinas de servicios a cliente. La demanda anual de estos conmutadores es de 15.000 unidades. Southeastern estima que el coste de almacenamiento anual de este artículo es de 25 dólares por unidad. El coste de emitir y procesar un pedido al proveedor es de 75 dólares. La empresa trabaja 300 días al año y el plazo para recibir un pedido del proveedor es de 8 días laborables. Calcule:

a) La cantidad económica de pedido.
b) El coste anual de almacenamiento.
c) El coste anual de emitir los pedidos.
d) El punto de pedido.

• **2.10.** El plazo de aprovisionamiento de uno de los productos de mayor movimiento es de 21 días. La demanda media durante ese periodo es de 100 unidades diarias. ¿Cuál sería un punto de pedido apropiado?

• **2.11.** La demanda anual de los cuadernos de notas en la papelería de Duncan es de 10.000 unidades. Dana Duncan abre su tienda 300 días al año y su proveedor tarda 5 días laborables en entregar un pedido. Calcule el punto de pedido de los cuadernos de notas.

: **2.12.** Marilyn Hart es agente de compras de la empresa Central Valve Company, que vende válvulas industriales y dispositivos de control de fluidos. Una de las válvulas que mejor se vende es la Western, cuya demanda anual es de 4.000 unidades. El coste de cada válvula es de 90 dólares, y el coste de almacenamiento del inventario asciende a 9 dólares. Marilyn ha hecho un estudio de los costes que acarrea la emisión de un pedido para cualquiera de las válvulas que almacena Central, y ha llegado a la conclusión de que el coste medio por pedido es de 25 dólares. Además, se necesitan unos 5 días laborables para que un pedido llegue desde el proveedor. Durante este tiempo, la demanda semanal de válvulas es de unas 80 unidades.

a) ¿Cuál es la cantidad económica de pedido?
b) ¿Cuál es el inventario medio si se utiliza esta cantidad económica de pedido?
c) ¿Cuál es el número óptimo de pedidos por año?
d) ¿Cuál es el número óptimo de días entre dos pedidos, suponiendo 250 días laborables al año?
e) ¿Cuál es el coste total anual de inventario (coste de almacenamiento + coste de lanzamiento)?
f) ¿Cuál es el punto de pedido?

2.13. El taller de maquinaria de Joe Henry utiliza 2.500 abrazaderas a lo largo de un año. Estas abrazaderas se compran a un proveedor a 130 kilómetros. Se tiene la siguiente información sobre las abrazaderas:

Demanda anual	2.500
Coste de almacenamiento por abrazadera y año	1,5$
Coste de lanzamiento por pedido	18,75$
Plazo de entrega	2 días
Días laborables al año	250

a) Dada la información anterior, ¿cuál es la cantidad económica de pedido?
b) Dado el EOQ, ¿cuál sería el inventario medio? ¿Cuál sería el coste de almacenamiento anual?
c) Dado el EOQ, ¿cuál sería el número óptimo de pedidos por año? ¿Cuál sería el coste anual de lanzamiento de pedidos?
d) Dado el EOQ, ¿cuál es el coste total anual de inventario (coste de almacenamiento + coste de lanzamiento)?
e) ¿Cuál es el número de días laborables entre pedidos?
f) ¿Cuál es el punto de pedido?

2.14. Myriah Fitzgibbon, de L. A. Plumbing utiliza 1.200 unidades de cierto repuesto que cuesta 25 dólares por cada pedido, con un coste anual de almacenamiento de 24 dólares.

a) Calcule el coste total para tamaños de pedido de 25, 40, 50, 60 y 100 unidades.
b) Determine la cantidad económica de pedido y analice las consecuencias de equivocarse en el cálculo de aquélla.

2.15. M. Cotteleer Electronics suministra circuitos impresos a una empresa que incorpora microprocesadores a frigoríficos y otros electrodomésticos. Uno de los componentes tiene una demanda anual de 250 unidades, y esto es constante durante todo el año. Se estima que el coste de almacenamiento asciende a un dólar por unidad y año, y el coste de lanzamiento es de 20 dólares por pedido.

a) Para minimizar los costes, ¿cuántas unidades hay que pedir cada vez que se hace un pedido?
b) ¿Cuántos pedidos al año se necesitan con la política óptima?
c) ¿Cuál es el inventario medio si se minimizan los costes?
d) Suponga que el coste de hacer un pedido no es de 20 dólares, y Patterson ha estado pidiendo 150 unidades cada vez que hacía un pedido. Para que esta política de pedidos (de $Q = 150$) sea óptima, calcule cuál debería ser el coste de lanzamiento.

2.16. La empresa de Bruce Woodworth elabora un producto cuya demanda anual es de 10.000 unidades. Como trabaja durante 200 días al año, la demanda está alrededor de 50 unidades al día. La producción diaria es de 200 unidades. Los costes de almacenamiento ascienden a 1 dólar por unidad y año; el coste de preparación es de 200 dólares. Si se desea producir este producto por lotes, ¿cuál es el tamaño óptimo del lote?

2.17. Radovilsky Manufacturing Company, en Hayward, California, fabrica luces destellantes para juguetes. La empresa tiene unas instalaciones productivas que abren 300 días al año. Tiene pedidos por unas 12.000 luces al año, y una capacidad de producción de 100 al día. Preparar la producción de las luces cuesta 50 dólares. El coste de cada luz asciende a 1 dólar. El coste de almacenamiento es de 0,1 dólares por luz y año.

a) ¿Cuál es el tamaño óptimo de la tanda de producción?
b) ¿Cuál es el coste medio de almacenamiento por año?
c) ¿Cuál es el coste medio de preparación por año?
d) ¿Cuál es el coste total por año, incluyendo el coste de las luces?

2.18. Arthur Meiners es el director de producción de Wheel-Rite, una pequeña empresa que produce piezas metálicas. Wheel-Rite suministra a Cal-Tex, una gran empresa de montajes, 10.000 cojinetes cada año. Este pedido se ha producido de forma estable desde hace algún tiempo. El coste de preparación de Wheel-Rite es de 40 dólares y el coste de almacenamiento es de 0,60 dólares por cada cojinete al año. Wheel-Rite puede producir 500 cojinetes de bolas por día. Cal-Tex es un fabricante que utiliza el sistema justo a tiempo y necesita recibir 50 cojinetes cada día.

a) ¿Cuál es la cantidad óptima de producción?
b) ¿Cuál es el máximo número de cojinetes que tendrá en su inventario Wheel-Rite?
c) ¿Cuántas tandas de producción de cojinetes hará Wheel-Rite al año?
d) ¿Cuál es el coste total de preparación + almacenamiento de Wheel-Rite?

2.19. Cesar Rogo Computers, una cadena de tiendas de informática de Mississippi, suministra a organizaciones educativas y comerciales dispositivos de memoria y almacenamiento. Actualmente tiene que tomar la siguiente decisión sobre la compra de CD-ROM:

D = 36.000 discos
S = 25$
H = 0,45$
Precio de compra = 0,85$
Precio con descuento = 0,82$
Cantidad necesaria para conseguir el descuento = 6.000 unidades.

¿Debe aprovechar el descuento?

2.20. La empresa McLeavey Manufacturing tiene una demanda de 1.000 bombas al año. El coste de una bomba es de 50 dólares. A esta empresa le cuesta 40 dólares lanzar un pedido, y los costes de almacenamiento son el 25 por ciento del coste unitario. Si las bombas se piden en una cantidad de 200 unidades, McLeavey obtiene un descuento del 3 por ciento. ¿Le compensa a McLeavey pedir 200 bombas de una vez para conseguir el descuento del 3 por ciento?

2.21. Wang Distributors tiene una demanda anual de 1.400 unidades para un detector de metales utilizado en los aeropuertos. El coste de un detector típico para Wang es de 400 dólares. Se estima que el coste de almacenamiento es el 20 por ciento del coste unitario, y el

coste de lanzar un pedido es de 25 dólares. Si Ping Wang, el propietario, hace pedidos de 300 o más unidades, puede obtener un descuento del 5 por ciento del coste de los detectores. ¿Debe aprovechar el descuento?

: P **2.22.** El precio normal de un componente de un lector de DVD es de 20 dólares. Si se hacen pedidos de 75 o más unidades, el precio se reduce a 18,50 dólares. Para pedidos de 100 unidades o más, el precio rebajado es de 15,75 dólares. En este momento, Sound Business, Inc., empresa fabricante de equipos de alta fidelidad, tiene un coste de almacenamiento de inventario del 5 por ciento por unidad y año, y su coste de emisión de pedido es de 10 dólares. La demanda anual es de 45 componentes. ¿Qué debería hacer Sound Business, Inc.?

: P **2.23.** Rocky Mountain Tire Center vende 20.000 neumáticos de un determinado tipo al año. El coste de lanzamiento es de 40 dólares, y el coste de almacenamiento es del 20 por ciento del precio de compra de los neumáticos por año. El precio de compra es de 20 dólares por neumático si se piden menos de 500 neumáticos, 18 dólares si se piden 500 o más pero menos de 1.000, y 17 si se piden 1.000 o más. ¿Cuántos neumáticos debería pedir Rocky Mountain cada vez que hace un pedido?

: P **2.24.** M. P. VanOyen Manufacturing ha pedido presupuestos para un determinado componente de un regulador. La demanda prevista es de 700 unidades al mes. Se puede comprar el artículo a Allen Manufacturing o a Baker Manufacturing. Sus listas de precios son las de la tabla que se muestra a continuación. El coste de lanzamiento es de 50 dólares y el coste anual de almacenamiento por unidad es de 5 dólares.

Allen Manufacturing		Baker Manufacturing	
Cantidad	**Precio unitario**	**Cantidad**	**Precio unitario**
1-499	16,00$	1-399	16,10$
500-999	15,50	400-799	15,60
1.000+	15,00	800+	15,10

a) ¿Cuál es la cantidad económica de pedido?
b) ¿Qué proveedor debe elegir? ¿Por qué?
c) ¿Cuál es la cantidad óptima del pedido y el coste total anual?

⋮ P **2.25.** La empresa Chris Sandvig Irrigation, Inc. ha resumido la lista de precios de cuatro posibles proveedores de una determinada válvula. *Véase* la siguiente tabla. El consumo anual es de 2.400 válvulas; el coste de emisión de pedido es de 10 dólares y el coste anual de almacenamiento es de 3,33 dólares por unidad.

¿Qué proveedor debería ser seleccionado y cuál es la cantidad óptima de pedido si Sandvig Irrigation quiere minimizar el coste total?

Proveedor A		Proveedor B		Proveedor C		Proveedor D	
Cantidad	**Precio**	**Cantidad**	**Precio**	**Cantidad**	**Precio**	**Cantidad**	**Precio**
1-49	35,00$	1-74	34,75$	1-99	34,50$	1-199	34,25$
50-74	34,75	75-149	34,00	100-199	33,75	200-399	33,00
75-149	33,55	150-299	32,80	200-399	32,50	400+	31,00
150-299	32,35	300-499	31,60	400+	31,10		
300-499	31,15	500+	30,50				
500+	30,75						

2.26. La empresa farmacéutica Emery Pharmaceutical utiliza un compuesto químico inestable que debe mantenerse en un ambiente de humedad y temperatura controladas. Emery emplea 800 libras de ese compuesto al mes, estima el coste de almacenamiento en el 50 por ciento del precio de coste (debido al deterioro), y estima el coste de lanzamiento de cada pedido en 50 dólares. En la siguiente tabla se muestran los precios de dos suministradores.

Proveedor 1		Proveedor 2	
Cantidad	Precio/libra	Cantidad	Precio/libra
1-499	17,00$	1-399	17,10$
500-999	16,75	400-799	16,85
1.000+	16,50	800-1199	16,60
		1.200+	16,25

a) ¿Cuál es la cantidad económica de pedido para cada proveedor?
b) ¿Qué cantidad debería pedirse y qué proveedor debería elegirse?
c) ¿Cuál es el coste total para el tamaño de pedido más económico?
d) ¿Qué factores deben considerarse además del coste total?

2.27. Barbara Flynn está encargada de mantener los suministros hospitalarios en el Hospital General. El año pasado, la demanda media de las vendas BX-5 durante el plazo de aprovisionamiento fue de 60 unidades (y distribuida normalmente). Además, la desviación estándar para la venda BX-5 era de 7. La señora Flynn quiere mantener un nivel de servicio del 90 por ciento.

a) ¿Cuál nivel de stock de seguridad recomendaría?
b) ¿Cuál es el punto de pedido?

2.28. Teniendo en cuenta la información disponible, la demanda durante el plazo de aprovisionamiento de los lectores de CD-ROM es, por término medio, de 50 unidades (con una distribución normal), y con una desviación estándar de 5 unidades. La dirección quiere un nivel de servicio del 97 por ciento.

a) ¿Qué valor de Z debería aplicar?
b) ¿Cuántos lectores de CD-ROM deberían mantenerse como stock de seguridad?
c) ¿Cuál es el punto de pedido adecuado?

2.29. Las sillas de ratán Authentic Tahi se suministran a la cadena de tiendas de Gary Schwartz, llamada La Tienda Katmandú, una vez año. El punto de pedido, sin stock de seguridad, es de 200 sillas. El coste de almacenamiento es de 15 dólares por silla y año, y el coste de rotura es de 70 dólares por silla y año. Dadas las siguientes probabilidades de demanda durante el periodo de aprovisionamiento, ¿cuánto stock de seguridad debe mantenerse?

Demanda durante el periodo de aprovisionamiento	Probabilidad
0	0,2
100	0,2
200	0,2
300	0,2
400	0,2

⁝**P** **2.30.** Vicky Smith, Inc. lanza una vez al año un pedido de libros de dibujos para niños y el punto de pedido, sin stock de seguridad (*dL*), es de 100 unidades. Los costes de almacenamiento son de 10 dólares por libro y año, y el coste de rotura es de 50 dólares por libro y año. Dadas las siguientes probabilidades de demanda durante el periodo de reaprovisionamiento, ¿qué stock de seguridad se debe utilizar?

Demanda durante el periodo de aprovisionamiento	Probabilidad
0	0,1
50	0,2
PP → 100	0,4
150	0,2
200	0,1
	1,0

⁝**P** **2.31.** Sr. Belleza, una organización que vende conjuntos de pesas para entrenamiento físico, tiene un coste de lanzamiento de 40 dólares por pedido para el conjunto BB-1. Los costes de almacenamiento del BB-1 ascienden a 5 dólares por conjunto y año. Para cubrir la demanda, el Sr. Belleza pide grandes cantidades de BB-1 siete veces al año. El coste de rotura del BB-1 se estima en 50 dólares por conjunto. A lo largo de los últimos años, el Sr. Belleza ha observado la siguiente demanda de BB-1 durante el plazo de aprovisionamiento:

Demanda durante el plazo de aprovisionamiento	Probabilidad
40	0,1
50	0,2
60	0,2
70	0,2
80	0,2
90	0,1
	1,0

El punto de pedido de BB-1 es de 60 unidades. ¿Qué nivel de stock de seguridad debe mantenerse para el artículo BB-1?

: **2.32.** El Hotel Hard Rock de Chicago distribuye una media de 1.000 toallas de baño al día a sus huéspedes en la piscina y en sus habitaciones. Esta demanda está normalmente distribuida con una desviación estándar de 100 toallas por día, basada en la ocupación. La empresa de lavandería que tiene el contrato de limpieza necesita un plazo de entrega de 2 días. El hotel desea un nivel de servicio del 98 por ciento para satisfacer las altas expectativas de sus huéspedes.

a) ¿Cuál es el PP?
b) ¿Cuál es el stock de seguridad?

: **2.33.** First Printing tiene contratos con bufetes de abogado de San Francisco para fotocopiar sus documentos judiciales. La demanda diaria es casi constante y asciende a 12.500 páginas de documentos. El plazo de entrega de la empresa que le suministra el papel para hacer las fotocopias sigue una distribución normal con media de 4 días y desviación estándar de 1 día. First Printing desea un nivel de servicio del 97 por ciento. Calcule su PP.

2.34. Gainesville Cigar almacena cigarros puros cubanos con plazos de entrega variables dadas las dificultades para importar el producto: dicho plazo sigue una distribución normal de media 6 semanas y desviación estándar de 2 semanas. La demanda también es variable y sigue una distribución normal con una media de 200 puros por semana y una desviación estándar de 25 puros. Para un nivel de servicio del 90 por ciento, ¿cuál es el PP?

2.35. Louisiana Power & Light pide postes de electricidad el primer día laborable de cada mes a su proveedor en Oregon. En este sistema de periodo fijo (sistema P) que utiliza la compañía, el inventario objetivo es de 40 postes. Ha llegado el momento de hacer un pedido y hay 5 postes en el almacén. A causa de un envío retrasado del mes pasado, 18 postes pedidos anteriormente deben llegar en breve. ¿Cuántos postes hay que pedir ahora?

2.36. Kim Clark le ha pedido que le ayude a determinar la mejor política de pedidos para un nuevo producto. La demanda prevista del nuevo producto es de unas 1.000 unidades al año. Para ayudarle a hacer una estimación de los costes de almacenamiento y de lanzamiento, Kim le ha dado la lista de los costes del año pasado. Cree que estos costes pueden ser aplicables a este nuevo producto.

Factor de coste	Coste ($)	Factor de coste	Coste ($)
Impuestos del nuevo almacén	2.000	Suministros de almacén	280
Inspección de recepción y entrada	1.500	Investigación y desarrollo	2.750
Desarrollo del nuevo producto	2.500	Salarios y sueldos del departamento de compras	30.000
Costes del departamento de contabilidad para pagos de facturas	500	Salarios y sueldos de almacén	12.800
Seguros de inventario	600	Hurtos de inventario	800
Publicidad de producto	800	Suministros para los pedidos de compra	500
Deterioros	750	Obsolescencia del inventario	300
Envío de pedidos de compra	800	Gastos generales del departamento de compras	1.000

También le ha informado que estos datos fueron obtenidos para los 10.000 artículos de inventario que fueron manejados o almacenados durante el año. Usted ha comprobado también que se emitieron 200 pedidos durante el año pasado. Su trabajo como nuevo diplomado en dirección de operaciones es ayudar a Kim a determinar la cantidad económica de pedido.

2.37. Emarpy Appliance es una empresa que fabrica todo tipo de grandes electrodomésticos. Bud Banis, presidente de Emarpy, está preocupado por la política de producción del frigorífico más vendido de la empresa. La demanda anual ha sido de unas 8.000 unidades al año, y esta demanda ha sido continua a lo largo del año. La capacidad de producción es de 200 unidades al día. Cada vez que se pone en marcha la producción, a la empresa le cuesta 120 dólares el llevar los materiales al lugar correspondiente, recomponer la cadena de ensamblaje y limpiar los equipos. El coste de almacenamiento de un frigorífico es de 50 dólares al año. El plan de producción actual establece fabricar 400 frigoríficos en cada tanda de producción. Suponga que se trabajan 250 días al año.

a) ¿Cuál es la demanda diaria de este producto?
b) Si la empresa siguiera fabricando 400 unidades cada vez que realiza una tanda de producción, ¿durante cuántos días se trabajaría en la tanda?

c) Con la política actual, ¿cuántas tandas de producción se necesitan al año? ¿Cuál sería el coste anual de preparación?

d) Si se sigue aplicando la política actual, ¿cuántos frigoríficos habría en inventario cuando se detuviera la producción? ¿Cuál sería el nivel medio de inventario?

e) Si la empresa fabrica 400 frigoríficos cada vez, ¿cuál sería el coste anual total de inventario (coste de preparación total anual y coste de almacenamiento total anual)?

f) Si Bud Banis quiere minimizar el coste anual total de inventario, ¿cuántos frigoríficos deberían fabricarse en cada tanda de producción? ¿Cuánto ahorraría a la empresa en costes de inventario la nueva política en comparación con la actual política de fabricar 400 unidades en cada tanda?

⋮ **2.38** Una cafetería de lujo en el centro de San Francisco abre 200 días al año y vende una media de 75 libras de café en grano Kona al día (se supone que la demanda sigue una distribución normal con una desviación estándar de 15 libras al día). Después de realizar un pedido (coste fijo = 16 dólares por pedido), el café en grano, que se envía desde Hawai, tiene un plazo de entrega de 4 días. Los costes de almacenamiento anual por libra de café en grano son de 3 dólares.

a) ¿Cuál es la cantidad económica de pedido del café Kona en grano?

b) ¿Cuál es el coste de almacenamiento total anual?

c) ¿Cuál es el coste de lanzamiento total anual de los pedidos?

d) Suponga que la dirección ha especificado que no se puede aceptar un riesgo de rotura superior al 1 por ciento. ¿Cuál sería el punto de pedido (PP)?

e) ¿Cuál es el stock de seguridad necesario para alcanzar un 1 por ciento de riesgo de rotura durante el tiempo de entrega?

f) ¿Cuál es el coste de almacenamiento anual por mantener el nivel del stock de seguridad necesario para asegurar el riesgo del 1 por ciento?

g) Si la dirección aceptase un riesgo de rotura del 2 por ciento durante el plazo de entrega, ¿aumentaría o disminuiría el coste de almacenamiento del stock de seguridad?



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales 2.39 a 2.51.

■ *Caso de estudio* ■

Zhou Bicycle Company

Zhou Bicycle Company (ZBC), de Seattle, es un distribuidor mayorista de bicicletas y recambios de bicicletas. Constituida en 1981 por el profesor Yong-Pin Zhou de la Universidad de Washington, las principales tiendas detallistas clientes de la empresa están en un radio de 650 kilómetros del centro de distribución. Estas tiendas reciben su pedido desde ZBC a los dos días de haber mandado la solicitud al centro de distribución, siempre que haya artículos en inventario. Sin embargo, si la empresa no satisface un pedido, no se crea un pedi-

do pendiente de servir al cliente (*backorder*); los minoristas obtienen sus suministros de otros distribuidores y ZBC pierde ese dinero.

La empresa distribuye una amplia variedad de bicicletas. El modelo más popular, y la principal fuente de ingresos para la empresa, es la bicicleta AirWing. ZBC recibe todos los modelos de un único fabricante de China, y los envíos tardan 4 semanas desde el momento en que se hace el pedido. Con el coste de comunicaciones, papeleo y trámites de aduanas incluidos, ZBC estima que cada vez que hace un pedido incurre en unos costes de 65 dólares. El precio de compra que paga ZBC por bicicleta es aproximadamente el 60 por ciento del precio de venta al público recomendado para todos los estilos disponibles, y el coste de almacenamiento es del 1 por ciento al mes (12 por ciento al año) del precio de compra pagado por ZBC. El precio de venta detallista (pagado por el público) de la bicicleta AirWin es de 170 dólares por bicicleta.

ZBC está interesada en hacer un plan de inventarios para 2008. La empresa quiere mantener un nivel de servicio del 95 por ciento con sus clientes para minimizar las pérdidas por los pedidos perdidos. Los datos recopilados en los dos últimos años se resumen en la siguiente tabla. Se ha desarrollado una previsión de ventas del modelo AirWing para 2008 y se utilizará para hacer un plan de inventarios para ZBC.

Demanda del modelo AirWing

Mes	2006	2007	Previsiones para 2008
Enero	6	7	8
Febrero	12	14	15
Marzo	24	27	31
Abril	46	53	59
Mayo	75	86	97
Junio	47	54	60
Julio	30	34	39
Agosto	18	21	14
Septiembre	13	15	16
Octubre	12	13	15
Noviembre	22	25	28
Diciembre	38	42	47
Total	343	391	439

Preguntas para el debate

1. Haga un plan de inventarios para ayudar a ZBC.
2. Analice los PP y los costes totales.
3. ¿Cómo puede tratar la demanda que no está dentro del horizonte de planificación?

Fuente: Profesor Kala Chand Seal, Loyola Marymount University.

■ Caso de estudio ■

Sturdivant Sound Systems

Sturdivant Sound Systems fabrica y vende sistemas de audio para el hogar y el automóvil. Todos los componentes de los sistemas de audio, excepto los reproductores de DVD, se fabrican en la planta de Rochester, Nueva York. Los reproductores de DVD utilizados en el montaje de los sistemas de Sturdivant se compran a Morris Electronics de Concord, Nueva Hampshire.

La agente de compras de Sturdivant, Mary Kim, envía un pedido de compra de reproductores de DVD una vez cada 4 semanas. Las necesidades anuales de la empresa ascienden a 5.000 unidades (20 por día laborable), y el coste por unidad es de 60 dólares (Sturdivant no compra en mayores cantidades porque Morris Electronics no ofrece descuentos por cantidad). Puesto que Morris promete la entrega de un pedido una semana después de su recepción, no suele haber rotura de stocks de reproductores de DVD (el tiempo total entre la fecha de lanzamiento del pedido y la fecha de su recepción es de 5 días).

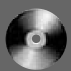
La compra de cada pedido acarrea unos costes de preparación. Estos costes, que ascienden a 20 dólares por pedido, incluyen los costes de preparar la solicitud del pedido, inspeccionar y almacenar los bienes recibidos, actualizar los registros del inventario, emitir un recibí y un cheque de pago. Además de los costes de preparación, Sturdivant incurre en costes de almacenamiento que incluyen seguros, almacenaje, manipulación, impuestos, etcétera. Estos costes ascienden a 6 dólares por unidad y año.

A partir de agosto de este año la dirección de Sturdivant va a poner en marcha un programa de control de costes en toda la empresa en un intento por mejorar los beneficios. Un área que se vigilará de cerca para lograr ahorros de costes es la de aprovisionamiento de inventarios.

Preguntas para el debate

1. Calcule la cantidad económica de pedido de los reproductores de DVD.
2. Calcule el punto de pedido (en unidades).
3. Calcule el ahorro de costes que logrará la empresa si implementa la decisión de aprovisionamiento de inventarios óptima.
4. ¿Debe considerarse que los costes de preparación de los pedidos son una función lineal del número de pedidos?

Fuente: Reproducido con autorización del profesor Jerry Kinard, Western Carolina University.



Caso de estudio en vídeo

Control del inventario en Wheeled Coach

El control del inventario es uno de los mayores problemas de Wheeled Coach. Al trabajar siguiendo una estrategia de personalización en masa y respuesta rápida al mercado, la dirección de la empresa sabe que su éxito depende de un estricto control del inventario. Cualquier otra cosa ocasiona incapacidad para entregar a tiempo a los clientes, caos en la línea de producción y enormes inversiones en inventario. Wheeled Coach sabe que casi el 50 por ciento de los entre 40.000 y 100.000 dólares que cuesta cada vehículo corresponde a materiales comprados. Una gran parte de ese 50 por ciento corresponde al chasis (que se compra a Ford), aluminio (de Reynolds Metal), y contrachapado de madera que se utiliza para revestimientos interiores y construcción de muebles y accesorios internos (adquirido a proveedores locales). Wheeled Coach realiza un cuidadoso seguimiento de estos materiales de clase A, manteniendo estrictos controles y medidas de seguridad, y haciendo los pedidos cuidadosamente de forma que se obtengan los máximos descuentos por cantidad a la vez que se minimiza el stock disponible. Debido a los largos plazos de entrega y a las necesidades de planificación de Reynolds, en realidad hay que hacer los pedidos de aluminio con 8 meses de antelación.

En una industria con tantos competidores como es la de la fabricación de ambulancias, pero en la que Wheeled Coach es el único gigante, sus 45 competidores no tienen suficiente fuerza compradora como para conseguir los mismos descuentos que Wheeled Coach logra. Pero esta ventaja competitiva en costes no puede considerarse con ligereza, según el presidente de la empresa, Bob Collins. "Los recuentos cíclicos en nuestros almacenes son críticos. Ninguna pieza puede salir de los almacenes sin figurar en una lista de materiales".

Unas listas de materiales (BOM) exactas son un requisito si se quiere que los productos se produzcan en el plazo necesario. Además, debido a la propia naturaleza de las ambulancias, de ser vehículos hechos por encargo (a medida), la mayor parte de los pedidos se consiguen después de un proceso de licitación. La exactitud de las listas de materiales (BOM) es fundamental para poder estimar con precisión los costes y poder hacer así correctamente las ofertas. Por estas razones, Collins insistió en que Wheeled Coach debe mantener un excelente control de inventario. La sección *perfil de una empresa global* sobre Wheeled Coach (que abre el Capítulo 4) da más detalles sobre el control de inventarios y el proceso de producción de ambulancias.

Preguntas para el debate*

1. Explique cómo lleva a cabo la empresa Wheeled Coach el análisis ABC.
2. Si usted tuviera que asumir la dirección del control de inventarios en Wheeled Coach, ¿qué otras políticas y técnicas emplearía para garantizar la exactitud de los registros del inventario?
3. ¿Qué pasos seguiría para aplicar esas sugerencias?

* Si lo desea, puede ver este caso en su CD antes de responder a las preguntas.

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Visite nuestra página personal www.prenhall.com/heizer para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Mayo Medical Center:** Este hospital se pasa a la tecnología de códigos de barra para controlar los inventarios.
- **Southwestern University: F:** La universidad tiene que decidir cuántos programas para los partidos de fútbol americano tiene que pedir, y a quién.
- **Professional Video Management:** Esta empresa debe tomar una decisión de descuento por cantidad.
- **Western Ranchman Outfitters:** Este caso trata de la aplicación del método EOQ con un proveedor de pantalones vaqueros poco fiable.
- **LaPlace Power & Light:** Esta empresa de servicios de energía eléctrica está evaluando sus actuales políticas de inventario.

Harvard ha seleccionado estos casos de la Harvard Business School para acompañar este capítulo (textbookcasematch.hbsp.harvard.edu):

- **Pioneer Hi-Bred International, Inc.** (#898-238): Aborda los retos de gestionar los inventarios en una gran explotación agrícola.
- **L.L. Bean Inc.: previsión de artículos y gestión de inventarios** (#893-003): La empresa tiene que equilibrar los costes de tener un inventario excesivo y un inventario deficiente cuando la demanda de artículos de venta por catálogo es incierta.
- **Blanchard Importing and Distribution Co., Inc.** (#673-033): Presenta dos tipos de errores fundamentales en el uso de los modelos EOQ.



BIBLIOGRAFÍA

Abernathy, Frederick H., John T. Dunlop, Janice H. Hammond, y David Weil. "Control Your Inventory in a World of Lean Retailing". *Harvard Business Review* 78, n.º 6 (noviembre-diciembre 2000): pp. 169-176.

Arnold, David. "Seven Rules of International Distribution". *Harvard Business Review* 78, n.º 6 (noviembre-diciembre 2000): pp. 131-137.

Bradley, James R., y Richard W. Conway. "Managing Cyclic Inventories". *Production and Operations Management* 12, n.º 4 (invierno 2003): pp. 464-479.

Cannon, Alan R., y Richard E. Crandall, "The Way Things Never Were". *APICS–The Performance Advantage* (enero 2004): pp. 32-35.

Chopra, Sunil, Gilles Reinhardt, y Maqbool Dada. "The Effect of Lead Time Uncertainty on Safety Stocks". *Decision Sciences* 35, n.º 1 (invierno 2004): pp. 1-24.

Coleman, B. Jay. "Determining the Correct Service Level Target". *Production and Inventory Management Journal* 41, n.º 1 (primer trimestre 2000): pp. 19-23.

Corsten, Daniel, y Nirmalya Kumar. "Profits in the Pie of the Beholder". *Harvard Business Review* (mayo 2003): pp. 22-23.

Landvater, D. V. *World Class Production and Inventory Management*. Newburg, NH: Oliver Wight Publications (1997).

Lieberman, M. B., S. Helper, y L. Demeester. "The Empirical Determinants of Inventory Levels in High-Volume Manufacturing". *Production and Operations Management* nº. 1 (primavera 1999): pp. 44-55.

Noblitt, James M. "The Economic Order Quantity Model: Panacea or Plague?" *APICS–The Performance Advantage* (febrero 2001): pp. 53-57.

Peterson, R., y E. A. Silver. *Decision Systems for Inventory Management and Production Planning*, 2.ª ed. New York: John Wiley & Sons (1998).

Robison, James A. "Inventory Profile Analysis: An Aggregation Technique for Improving Customer Service while Reducing Inventory". *Production and Inventory Management Journal* 42, n.º 2 (segundo trimestre 2001): pp. 8-13.

Rubin, Paul A., y W. C. Benton. "A Generalized Framework for Quantity Discount Pricing Schedules". *Decision Sciences* 34, n.º 1 (invierno 2003): pp. 173-188.

Sell, William H. "Recovering Value from I.O.$". *APICS–The Performance Advantage* (noviembre-diciembre 2003): pp. 50-53.

Tersine, Richard J. *Principles of Inventory and Materials Management*, 4.ª ed. New York: Elsevier North-Holland (1994).

Vollmann, T. E., W. L. Berry, y D. C. Whybark. *Manufacturing Planning and Control Systems*, 5.ª ed. Burr Ridge, IL: Irwin/McGraw-Hill (1998).

Zipkin, Paul. *Foundations of Inventory Management*. New York: Irwin/McGraw-Hill (2000).



RECURSOS EN INTERNET

APICS: The Educational Society for Resource Management:
http://www.apics.org

Center for Inventory Management
http://www.inventorymanagement.com

Institute of Industrial Engineers:
http://www.iienet.org

Inventory Control Forum:
http://www.cris.com/~kthill/sites.htm

List of inventory control related sites:
http://www.cris.com/~kthill/sites.htm

PLANIFICACIÓN AGREGADA

3

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando haya completado este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Planificación agregada
- Programación táctica
- Técnica gráfica de planificación agregada
- Técnicas matemáticas de planificación

Describir o explicar:

- Cómo realizar la planificación agregada
- Cómo desarrollan planes agregados las empresas de servicios

PERFIL DE UNA EMPRESA GLOBAL: ANHEUSER-BUSCH

La planificación agregada proporciona una ventaja competitiva a Anheuser-Busch

La materia prima va a los depósitos donde se cuece el mosto, que más tarde se convertirá en cerveza, y donde se añade el lúpulo para conferir el sabor y el carácter amargo.

En la sala de control de la planta, el control de procesos utiliza computadoras para vigilar el inicio del proceso de bodega, donde el mosto se encuentra en el último tramo de preparación antes de su fermentación en cerveza.

La línea de envasado imprime en cada lata un código que identifica el día, el año y el periodo de 15 minutos de producción; así como la planta en donde el producto fue elaborado y envasado y la línea de producción utilizada. Este sistema permite que se pueda seguir y corregir cualquier problema de control de calidad.

Un ingrediente esencial, el lúpulo, se añade a la cerveza para darle «carácter».

Anheuser-Busch produce casi el 40 por ciento de la cerveza que se consume en Estados Unidos. La empresa consigue ser eficiente con tal volumen de producción gracias a su excelente habilidad para ajustar su capacidad a la demanda.

El objetivo de la planificación agregada es ajustar capacidad y demanda a medio plazo (3 a 18 meses). Anheuser-Busch iguala la demanda fluctuante por marca a la capacidad específica de planta, mano de obra e inventario. Una meticulosa limpieza entre los diferentes lotes de producción, un eficaz mantenimiento y una eficiente programación de empleados e instalaciones contribuyen a una elevada utilización de las instalaciones, un factor muy importante en todas las instalaciones con alta inversión de capital.

La cerveza se produce en una instalación orientada al producto, que produce alto volumen y poca variedad. Los procesos de producción orientados al producto comportan generalmente elevados costes fijos, pero también tienen el beneficio de unos bajos costes variables. El mantener una elevada utilización de estas instalaciones es esencial, ya que los altos costes de capital asociados exigen una alta utilización de aquéllas para ser competitivas. Producir por encima del punto de equilibrio requiere una gran utilización, y cualquier tiempo de inactividad es desastroso.

La producción de cerveza puede dividirse en cuatro fases. La primera fase es seleccionar y garantizar el suministro y calidad de las materias primas. La segunda fase es el proceso de fabricación de la cerveza propiamente dicho, que abarca desde la molturación de la malta hasta la fermentación. La tercera fase es el envasado en la amplia variedad de envases que demanda el mercado.

La cuarta y última fase es la distribución, que incluye la entrega y el almacenaje a temperatura controlada. Cada fase tiene sus limitaciones de recursos. Es pues necesario desarrollar un plan agregado para conseguir que todo funcione. Una planificación agregada eficaz es un importante elemento en la ventaja competitiva de Anheuser-Busch.

Fabricantes como Anheuser-Busch, GE y Yamaha tienen que hacer frente a complejas decisiones cuando tratan de planificar productos como cerveza, aire acondicionado o motos acuáticas, cuya demanda es muy dependiente de variaciones estacionales. Si las empresas aumentasen su producción y el verano fuese más caluroso de lo habitual, aumentarían sus ventas y su cuota de mercado. Pero si el verano fuese frío, podrían quedarse en los almacenes con productos de precios elevados sin vender. Una de las principales funciones del director de operaciones es el desarrollo de planes que minimicen los costes en función de las previsiones.

La **planificación agregada** (también conocida como **programación agregada**) se ocupa de determinar la cantidad que se producirá y cuándo se producirá en un futuro a medio plazo, generalmente entre 3 y 18 meses. Los directores de operaciones tratan de determinar la mejor manera de satisfacer la demanda prevista ajustando los ritmos de producción, los niveles de mano de obra, los niveles de inventario, la cantidad de horas extras, las tasas de subcontratación y otras variables controlables. Normalmente, *el objetivo de la planificación agregada es minimizar el coste total durante el periodo de planificación*. Sin embargo, otros objetivos estratégicos pueden ser más importantes que un coste reducido. Estas estrategias pueden buscar alisar las necesidades de mano de obra, rebajar los niveles de inventario o conseguir un alto nivel de servicio.

Para los fabricantes, el plan agregado liga los objetivos estratégicos de la empresa con los planes de producción, pero en las empresas de servicios, el plan agregado relaciona los objetivos estratégicos con la programación de la mano de obra.

La planificación agregada requiere cuatro elementos:

- Una unidad lógica global para medir las ventas y la producción, tal y como son los equipos de aire acondicionado en el caso de GE o las cajas de cerveza de Anheuser-Busch.
- Una previsión de la demanda en estas unidades agregadas para un periodo de planificación razonable a medio plazo.
- Un método para poder determinar los costes, que tratamos en este capítulo.
- Un modelo que combine previsiones y costes, de manera que puedan tomarse decisiones de planificación para el periodo planificado.

En este capítulo describimos las decisiones de planificación agregada, mostramos cómo encaja el plan agregado en el proceso global de planificación, y describimos diferentes técnicas que utilizan los directivos para desarrollar un plan agregado. Haremos hincapié tanto en empresas manufactureras como en empresas del sector de servicios.

DIEZ DECISIONES ESTRATÉGICAS DE DIRECCIÓN DE OPERACIONES

- Diseño de bienes y servicios
- Gestión de la calidad
- Estrategia de proceso
- Estrategias de localización
- Estrategias de layout
- Recursos humanos
- Dirección de la cadena de suministros
- Gestión del inventario
- **Programación**
  - **Agregada**
  - Corto plazo
- Mantenimiento

EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN

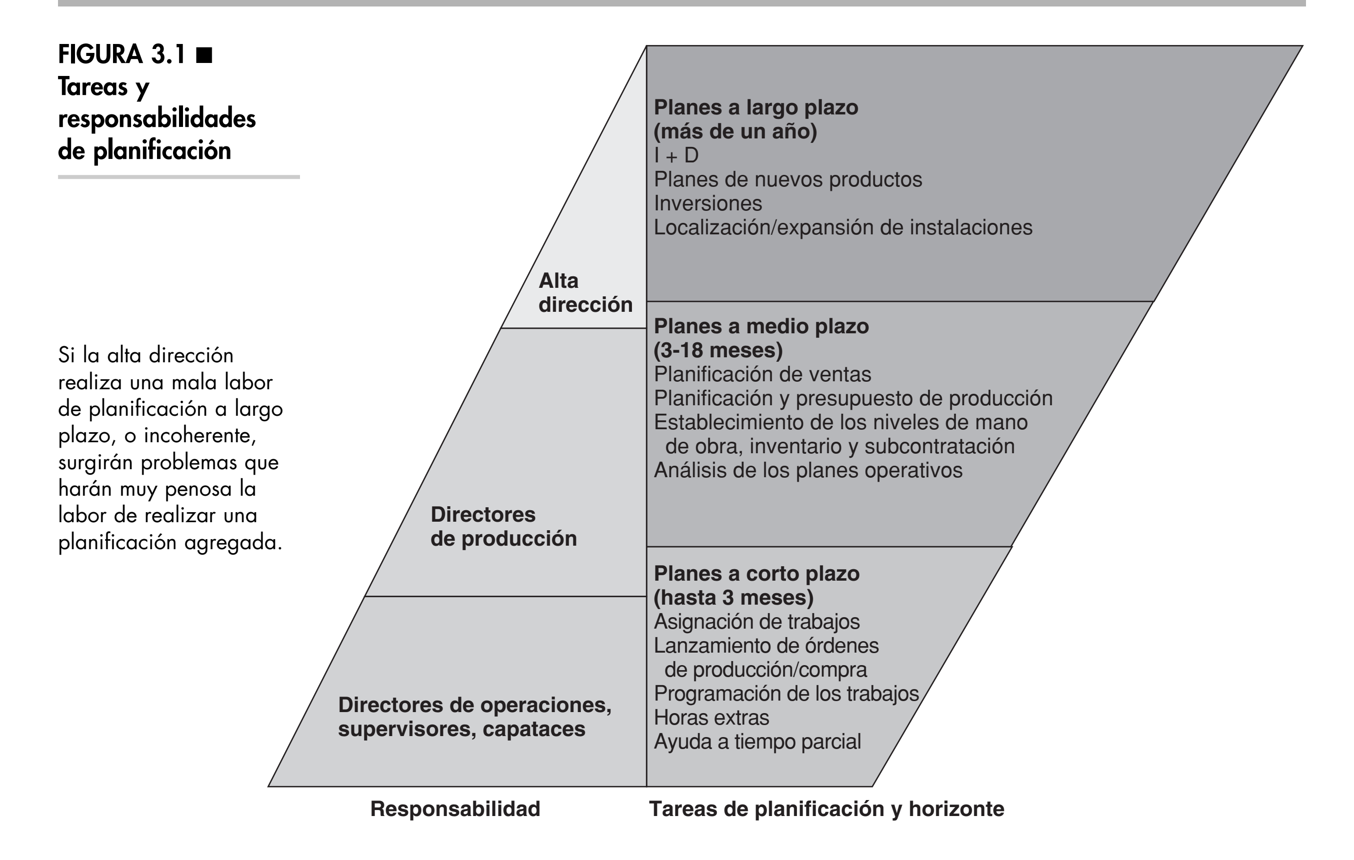
En el Capítulo 4 del volumen *Decisiones Estratégicas* vimos que las previsiones de la demanda pueden hacerse a corto, medio y largo plazo. Las previsiones a largo plazo ayudan a los directivos a tratar problemas de capacidad y estrategia, y son responsabilidad de la alta dirección (*véase* la Figura 3.1). La alta dirección se plantea cuestiones relacionadas con la política a seguir, como la localización y expansión de las instalaciones, el desarrollo de nuevos productos, la financiación de la investigación y las inversiones a realizar en un periodo de varios años.

La planificación a medio plazo comienza una vez tomadas las decisiones de capacidad a largo plazo. Éste es un trabajo de los directores de operaciones. Las **decisiones de planificación** tratan resolver el problema de igualar la producción a demandas fluctuantes. Estos planes tienen que ser coherentes con la estrategia a largo plazo elaborada por la alta

Planificación agregada (o programación agregada)
Enfoque para determinar la cantidad que se producirá y cuándo se producirá en un futuro a medio plazo (generalmente entre 3 y 18 meses).

Decisiones de planificación
Realizar planes que ajusten la producción a los cambios en la demanda.

FIGURA 3.1 ■ Tareas y responsabilidades de planificación



Si la alta dirección realiza una mala labor de planificación a largo plazo, o incoherente, surgirán problemas que harán muy penosa la labor de realizar una planificación agregada.

dirección y trabajar con los recursos asignados en decisiones estratégicas anteriores. La planificación a medio plazo (o "intermedia") se lleva a cabo con el desarrollo de un plan agregado de producción.

La planificación a corto plazo se puede extender hasta un periodo de un año, pero normalmente es inferior a tres meses. Este plan también es responsabilidad del personal de operaciones, que trabajan con los supervisores y capataces para "desagregar" el plan a medio plazo en programaciones semanales, diarias y por horas. Las tácticas para efectuar la planificación a corto plazo comprenden la carga, secuenciación, agilización y expedición de los pedidos, y otras cuestiones que se tratan en el Capítulo 5.

La Figura 3.1 muestra los horizontes temporales y las características de la planificación a corto, medio y largo plazo.

LA NATURALEZA DE LA PLANIFICACIÓN AGREGADA

Tal como sugiere el término *agregado*, un plan agregado significa agrupar los recursos correpondientes en términos generales o globales. Dada la previsión de la demanda, la capacidad de la instalación, los niveles de inventario, la plantilla y los inputs relacionados, el planificador tiene que seleccionar la tasa (volumen) de producción de la instalación durante los próximos 3 a 18 meses. El plan puede desarrollarse para empresas manufactureras como Anheuser-Busch o Whirlpool, para hospitales, colegios, o para Prentice Hall, la editorial que publicó este libro de texto.

Tomemos como ejemplo de empresa manufacturera a IBM o a Hewlett-Packard, que producen distintos modelos de microordenadores. Fabrican (1) portátiles, (2) PC de sobre-

mesa, (3) agendas electrónicas y (4) equipos de tecnología avanzada con chips de alta velocidad. Durante los próximos tres trimestres, la planificación agregada de IBM o Hewlett-Packard podría tener el siguiente output cada mes (en unidades de producción) para esta "familia" de microordenadores:

1.er trimestre			2.º trimestre			3.er trimestre		
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.
150.000	120.000	110.000	100.000	130.000	150.000	180.000	150.000	140.000

Observe que el plan presenta la producción *agregada*, no desglosada producto a producto. De la misma manera, un plan agregado de GM indicaría al constructor de vehículos cuántos automóviles ha de fabricar, pero no cuántos deben ser de dos puertas frente a los de cuatro puertas, o rojos o verdes. Indicaría a Nucor Steel cuántas toneladas de acero debe producir, pero no establece ninguna diferencia entre los distintos tipos de acero.

En el sector servicios consideremos el caso de Computrain, una empresa que imparte cursos de ofimática a directivos. La empresa imparte cursos sobre utilización de hojas de cálculo, gráficos, bases de datos, procesadores de texto y diseño de páginas web, y emplea a diferentes profesores para hacer frente a la demanda de sus servicios por parte de empresas y de organismos gubernamentales. La demanda de formación tiende a ser muy baja durante las épocas próximas a las temporadas de fiestas y en el verano, cuando mucha gente se va de vacaciones. Para hacer frente a la demanda fluctuante de cursos, la empresa puede contratar y despedir a profesores, hacer publicidad para aumentar la demanda en las temporadas bajas, o subcontratar su trabajo a otras empresas de formación durante los periodos punta. De nuevo, la planificación agregada tomará decisiones sobre la capacidad a medio plazo, sin entrar en detalles sobre cursos o profesores específicos.

La planificación agregada es parte de un sistema mayor de planificación de la producción. En consecuencia, es muy útil entender las relaciones entre el plan y diferentes factores internos y externos. La Figura 3.2 muestra que el director de operaciones no sólo recibe información sobre las previsiones de demanda desde el departamento de marketing, sino que también debe trabajar con datos financieros, de recursos humanos, de capacidad y de disponibilidad de materias primas. En un entorno de fabricación, el proceso de descomponer el plan agregado en un mayor detalle se denomina **desagregación**. La desagregación genera un **plan (programa) maestro de producción**, que es un input para los sistemas de planificación de las necesidades de materiales (MRP: *Material Requirements Planning*), que determinan la adquisición o producción de las piezas o componentes necesarios para hacer el producto final (*véase* el Capítulo 4). Los programas detallados de trabajo para los operarios y la programación de prioridades para los productos constituyen la etapa final del sistema de planificación de la producción (y se analizan en el Capítulo 5).

Desagregación
Proceso de descomponer la planificación agregada en otros planes de mayor detalle.

Plan (Programa) maestro de producción
Programa que especifica qué se debe hacer y cuándo.

ESTRATEGIAS DE PLANIFICACIÓN AGREGADA

Existen varias preguntas que el director de operaciones debe responder cuando hace un plan agregado:

1. ¿Se deben utilizar los inventarios para absorber los cambios en la demanda durante el periodo de planificación?
2. ¿Debe la empresa ajustarse a los cambios variando el tamaño de la plantilla?
3. ¿Debe utilizar empleados a tiempo parcial o utilizar las horas extras y el tiempo de inactividad para absorber las fluctuaciones?

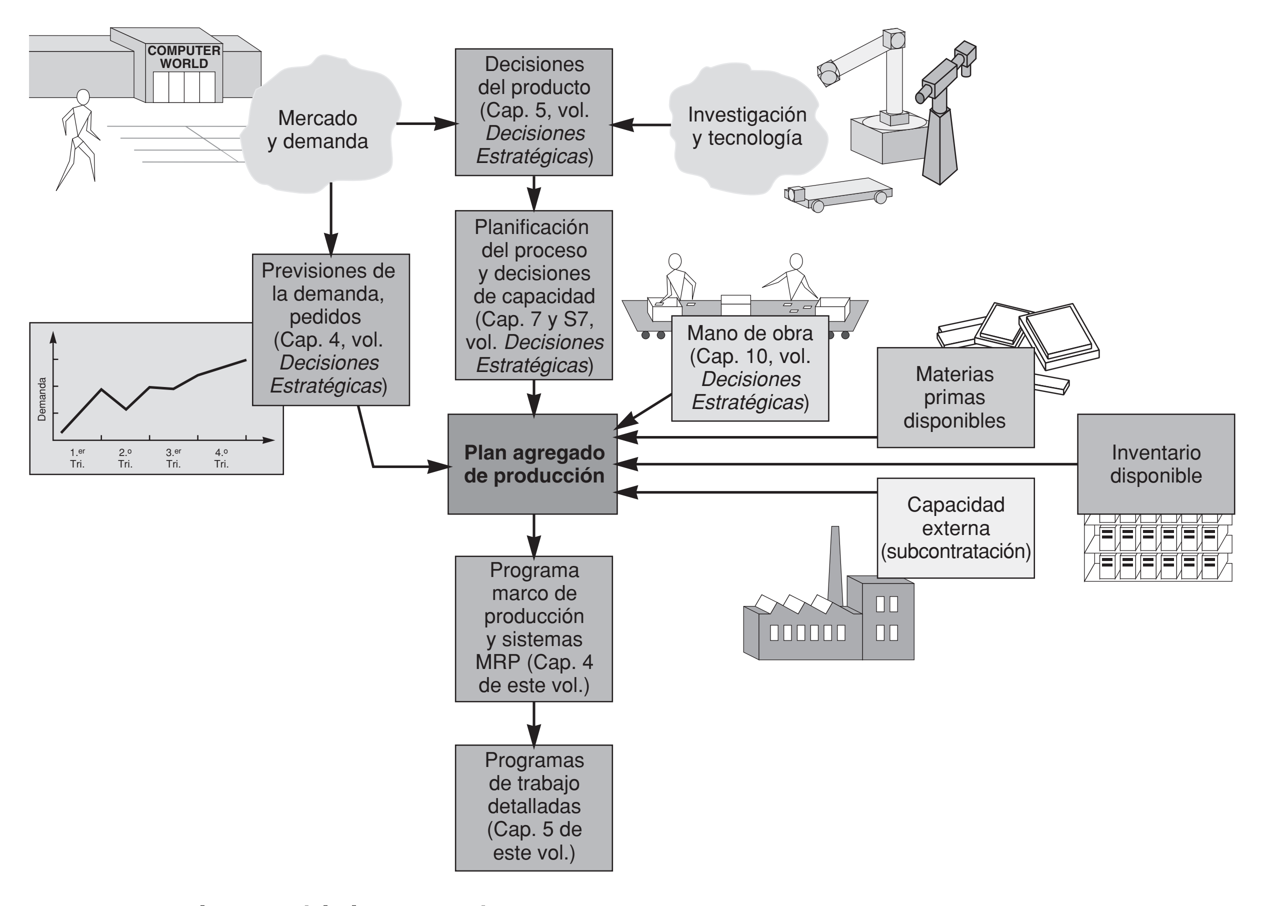


FIGURA 3.2 ■ Relaciones del plan agregado

4. ¿Debe utilizarse la subcontratación durante la fluctuación de pedidos para mantener una plantilla estable?
5. ¿Deben modificarse los precios u otros factores para influir sobre la demanda?

Todas las anteriores son estrategias legítimas de planificación. Suponen la variación del inventario, de las tasas de producción, de los niveles de mano de obra, de la capacidad y de otras variables controlables. A continuación examinaremos más detalladamente ocho opciones. Las cinco primeras se denominan *opciones de capacidad* porque no tratan de modificar la demanda, sino que intentan absorber sus fluctuaciones. Las tres últimas son *opciones de demanda*, a través de las cuales las empresas intentan alisar los cambios en el patrón de demanda durante el periodo de planificación.

Opciones de capacidad

La planificación agregada en el mundo real conlleva un gran número de ensayos de prueba y error.

Las opciones básicas sobre capacidad (producción) que puede tomar una empresa son las siguientes:

1. *Cambiar los niveles de inventario*. Los directores pueden aumentar el inventario durante los periodos de baja demanda para hacer frente a una demanda alta en

periodos futuros. Esta estrategia incrementa los costes asociados con el almacenamiento, seguros, manutención, obsolescencia, robos y capital invertido (estos costes normalmente oscilan entre un 15 y un 40 por ciento del valor del artículo anualmente). Por otro lado, cuando la empresa entra en un periodo de demanda creciente, la rotura de stock puede provocar la pérdida de ventas debido a plazos de entrega potencialmente más largos y un peor servicio al cliente.

2. *Variar el tamaño de la plantilla contratando o despidiendo personal*. Una forma de hacer frente a la demanda es contratar o despedir a empleados de producción para ajustar las tasas de producción. Pero, a menudo, hay que formar a los nuevos empleados, y la productividad media baja temporalmente mientras se integran en la empresa. Los despidos, por supuesto, traen como consecuencia una caída de la moral de los empleados y pueden desembocar en una menor productividad.
3. *Variar los volúmenes de producción mediante horas extras o aprovechando las horas de inactividad*. A veces es posible mantener constante la mano de obra variando las horas de trabajo, reduciendo el número de horas de trabajo cuando la demanda es baja e incrementándolo cuando la demanda aumenta. No obstante, cuando la demanda experimenta un gran crecimiento hay un límite en la cantidad de horas extras que se pueden realizar razonablemente. El coste de las horas extras es más alto que el de las normales, y demasiadas horas extras pueden agotar a los empleados, hasta el punto de que la productividad total disminuya. Las horas extras también implican un aumento de gastos generales asociados a mantener abierto el centro de trabajo. Por otra parte, cuando hay un periodo de demanda decreciente, la empresa debe amortiguar de algún modo el tiempo inactivo de los empleados, lo que normalmente es difícil.
4. *Subcontratar*. Una empresa puede adquirir capacidad temporal subcontratando trabajos en periodos de picos de demanda. Sin embargo, esto tiene algunos riesgos. Primero, puede ser caro. Segundo, se corre el riesgo de abrir las puertas de

La enorme flota de aviones de Federal Express se encuentra casi al límite de su capacidad para los envíos nocturnos de paquetes, pero permanece completamente inactiva durante el día. En un intento de utilizar mejor su capacidad (y financiar sus activos), Federal Express consideró dos servicios con patrones de demanda opuestos o de ciclos contrarios al de su servicio nocturno: un servicio diario de pasajeros abonados y un servicio chárter de pasajeros. Sin embargo, después de un minucioso análisis de estos nuevos servicios, se consideró insuficiente el 12 o 13 por ciento de retorno de la inversión obtenido para el riesgo que acarreaba. Por el contrario, y teniendo en cuenta los mismos argumentos, UPS decidió recientemente lanzar una línea chárter que opera los fines de semana.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

UN CUENTO DE DOS SERVICIOS DE MENSAJERÍA

Federal Express y United Parcel Service son competidores directos en el sector de envíos de paquetería. Ambas empresas tienen éxito, pero abordan la planificación agregada de forma bastante distinta.

Los directivos de Federal Express utilizan un gran número de trabajadores a tiempo parcial en su enorme centro de clasificación de paquetes. Este centro de Memphis está diseñado y dotado de personal para clasificar alrededor de un millón de sobres y paquetes en un breve turno de cuatro horas durante la mitad de la noche. Federal Express descubrió que los estudiantes de las universidades proporcionaban una buena fuente de mano de obra. Estos trabajadores a tiempo parcial, repletos de energía, ayudan a hacer frente a los picos de demanda, y además, la empresa cree que trabajadores a tiempo completo no podrían utilizarse eficazmente en un turno completo de 8 horas.

En el centro de clasificación de paquetería de UPS, la dirección también se planteó trabajar con personal fijo o a tiempo parcial. UPS eligió el mayoritario enfoque de tiempo completo. La empresa estudió a fondo los diseños y los procesos de trabajo, esperando proporcionar un alto nivel de satisfacción en el trabajo y un fuerte sentido de trabajo en equipo. Las horas de trabajo en UPS son largas, el trabajo es duro, y no falta en UPS quien se queje de los exigentes niveles de productividad de la empresa. Pero, cuando se produce una vacante, UPS nunca ha carecido de aspirantes.

Fuentes: Workforce (junio de 2003): 18; *Knight Ridder Tribune Business News* (24 de noviembre de 2004): 1; y *Fast Company* (agosto de 2002) 102-107.

un cliente a un competidor. Y tercero, es difícil encontrar al proveedor subcontratado perfecto, que siempre envíe el producto de calidad a tiempo.

5. *Utilizar empleados a tiempo parcial.* Especialmente en el sector servicios, los empleados a tiempo parcial pueden cubrir necesidades de mano de obra poco cualificada. Esta práctica es común en restaurantes, tiendas detallistas y supermercados. El recuadro de *Dirección de producción en acción* sobre Federal Express y United Parcel Service ofrece dos visiones de esta estrategia.

Opciones de demanda

Las opciones básicas sobre la demanda son las siguientes:

1. *Influir sobre la demanda*. Cuando la demanda es baja, una empresa puede intentar aumentarla mediante publicidad, promociones, venta directa y rebajando los precios. Por ejemplo, las compañías aéreas y los hoteles llevan mucho tiempo ofreciendo descuentos de fin de semana y precios de temporada baja; las empresas telefónicas cobran menos por la noche; algunas universidades ofrecen descuentos a personas mayores, y los aparatos de aire acondicionado son más baratos en invierno. No obstante, las acciones en publicidad, en promociones, en ventas y en precios no son siempre capaces de ajustar la demanda a la capacidad de producción.
2. *Retención de pedidos (back ordering) durante los periodos de alta demanda.* Los pedidos retenidos son pedidos de bienes o servicios que una empresa acepta, pero que es incapaz de satisfacer en el momento (a propósito o por casualidad). Esta estrategia únicamente es viable si los clientes están dispuestos a esperar, sin que ello suponga pérdida de prestigio para nuestra empresa, o no cancelan su pedido. Muchas empresas retienen pedidos, pero a menudo la consecuencia es la pérdida de ventas.
3. *Combinación de productos y servicios con ciclos de demanda complementarios*. Una técnica utilizada por muchas empresas manufactureras para suavizar las variaciones de la demanda consiste en desarrollar una combinación de productos cuya demanda varía de forma opuesta en las distintas épocas del año. Los ejemplos comprenden empresas que fabrican aparatos de calefacción y aparatos de aire acondicionado, o cortacéspedes y quitanieves. Sin embargo, las empresas que siguen este enfoque pueden involucrarse en la producción de bienes o servicios para los que no tienen experiencia o que están fuera de su mercado objetivo.

Un *inventario negativo* significa que debemos unidades a los clientes. Podemos perder ventas o diferir el pedido para completarlo.

John Deere and Company, el "abuelo" de los fabricantes de equipos agrícolas, utiliza incentivos de ventas para suavizar la demanda. Durante las temporadas bajas de otoño e invierno las ventas se potencian con recortes de precios y otros incentivos. Cerca del 70 por ciento de las grandes máquinas de Deere se piden con antelación a la temporada de uso (casi el doble de la tasa de esa industria). Los incentivos reducen los márgenes, pero Deere mantiene su cuota de mercado y controla los costes al producir de forma más establer a lo largo del año. Análogamente, en negocios de servicios como L.L. Bean, a algunos clientes se les ofrece gratuidad en los portes para pedidos realizados antes de la campaña de Navidad.

Estas ocho opciones, con todas sus ventajas y desventajas, están resumidas en la Tabla 3.1.

Opciones mixtas para desarrollar un plan

Aunque cada una de las cinco opciones de capacidad y de las tres opciones de demanda descritas anteriormente podría producir un plan agregado eficaz, a menudo, una combinación de las opciones de capacidad y de demanda es mejor.

Muchos fabricantes suponen que las opciones de demanda han sido totalmente estudiadas por el departamento de marketing, y las opciones más razonables se han incorporado en la previsión de la demanda. El director de operaciones entonces puede elaborar el plan agregado basándose en esa previsión. Sin embargo, utilizando las cinco opciones de capacidad a su disposición, el director de operaciones todavía dispondría de innumerables planes posibles. Estos planes pueden expresar, por un lado, una *estrategia de seguimiento*

TABLA 3.1 ■ Opciones de planificación agregada: ventajas y desventajas

Opción	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Cambiar los niveles de inventario.	Los cambios en recursos humanos son graduales o nulos; no hay cambios bruscos en la producción.	Los costes de mantenimiento de inventarios pueden aumentar. Las roturas de stock pueden provocar pérdidas de ventas.	Se aplica fundamentalmente a operaciones de producción, no de servicios.
Variar el tamaño de la plantilla contratando y despidiendo personal.	Evita los costes de las otras alternativas.	Los costes de contratación, despidos y formación pueden ser importantes.	Utilizado donde existe mucha mano de obra.
Variar los volúmenes de producción mediante horas extras o aprovechando las horas de inactividad.	Equilibra las fluctuaciones estacionales sin costes de contratación / formación.	Primas por horas extras; empleados cansados; puede no satisfacer la demanda.	Permite flexibilidad dentro de la planificación agregada.
Subcontratación.	Permite flexibilidad y suavizar la producción de la empresa.	Pérdida del control de la calidad. Beneficios reducidos. Pérdida de futuros negocios.	Se aplica principalmente a entornos de producción.
Utilizar empleados a tiempo parcial.	Menos costes y más flexibilidad que con los empleados fijos.	Costes elevados de renovación/formación; la calidad sufre; difícil programación.	Indicado para trabajos no cualificados en zonas con gran disponibilidad de mano de obra temporal.
Influir sobre la demanda.	Intenta utilizar la capacidad sobrante. Los descuentos atraen a nuevos clientes.	Incertidumbre en la demanda. Difícil de igualar exactamente la demanda con la capacidad.	Crea ideas de marketing. El *overbooking* (sobreventa) se utiliza en algunos negocios.
***Back ordering* (retención de pedidos) en periodos de alta demanda.**	Puede evitar las horas extras. Mantiene constante la capacidad.	El cliente debe de estar dispuesto a esperar, pero se pierde el prestigio (goodwill) de la empresa.	Muchas empresas adoptan *back ordering.*
Combinación de productos y servicios con ciclos de demanda complementarios.	Utiliza totalmente los recursos. Permite una mano de obra constante.	Puede exigir habilidades o equipos que están fuera de las áreas de experiencia de la empresa.	No es facil encontrar productos o servicios con patrones de demanda opuestos.

o caza de la demanda y, por otro, una *estrategia de planificación nivelada o estable*. También podrían, por supuesto, expresar otra opción que se encuentre entre las dos.

Estrategia de seguimiento o caza Una **estrategia de seguimiento o caza** intenta conseguir niveles de producción que igualen la previsión de la demanda para cada periodo. Esta estrategia se puede llevar a cabo de varias maneras. Por ejemplo, el director de operaciones podría variar los niveles de mano de obra contratando o despidiendo a trabajadores, o puede variar la producción mediante horas extras, aprovechando las horas de inactividad, con empleados a tiempo parcial o subcontratando la producción a otras empresas. Muchas organizaciones de servicios utilizan la estrategia de seguimiento ya que es difícil

Estrategia de seguimiento (o de caza)
Establece una producción igual a la demanda prevista.

o imposible adoptar la opción de actuar sobre el inventario. Ejemplos de industrias que trabajan con la estrategia de seguimiento son, entre otras, la educación, los servicios hospitalarios y la construcción.

Planificación nivelada
Mantiene constante el volumen de output, la tasa de producción, o el nivel de mano de obra durante el horizonte de planificación.

Estrategia de planificación nivelada o estable Una estrategia de estabilidad (o de **planificación nivelada o estable**) consiste en un plan agregado en el que la producción diaria es constante periodo a periodo. Empresas como Toyota y Nissan mantienen niveles de producción uniformes y pueden (1) permitir que el inventario de productos acabados crezca o disminuya para amortiguar la diferencia entre demanda y producción o (2) encontrar un trabajo alternativo para los empleados. Su filosofía es que una plantilla constante conduce a productos de mejor calidad, a menos rotación y absentismo, y a un mayor compromiso de los empleados con los objetivos de la empresa. Otros ahorros ocultos son que los empleados tienen más experiencia, una más fácil programación y supervisión, y menos arranques y paradas bruscas. La planificación nivelada funciona bien cuando la demanda también es relativamente estable.

MÉTODOS DE PLANIFICACIÓN AGREGADA

Estrategias mixtas
Estrategia de planificación que utiliza dos o más variables controlables para establecer un plan de producción factible.

Para la mayoría de las empresas no es probable que la estrategia de seguimiento ni la estrategia de nivelación sean ideales, por lo que habrá que estudiar la posibilidad de crear una combinación de las ocho opciones (lo que se denomina una **estrategia mixta**) para conseguir el mínimo coste. Sin embargo, porque hay un gran número de posibles estrategias mixtas, los directores creen que la definición de ese plan agregado puede constituir un gran reto. No siempre es posible encontrar el plan "óptimo". De hecho, algunas empresas no tienen un proceso formal de planificación agregada: Utilizan el mismo plan año tras año, haciendo ajustes arriba y abajo únicamente para adecuarse a la nueva demanda anual. Este método ciertamente no proporciona mucha flexibilidad, y si el plan original no fuese óptimo, todo el proceso de producción quedaría atrapado en un rendimiento subóptimo.

Los planes mixtos son más complejos que los simples o "puros", pero generalmente dan lugar a una mejor estrategia.

En esta sección presentamos varias técnicas que utilizan los directores de operaciones para desarrollar planes agregados más útiles y apropiados. Van desde el muy utilizado método de las tablas (o gráfico) hasta una serie de enfoques matemáticos más formales, entre los que se incluye el método del transporte de la programación lineal.

Métodos de tablas y gráficos

Técnicas de gráficos y tablas
Técnicas de planificación agregada que funcionan con unas pocas variables a la vez, para permitir a los planificadores comparar la demanda prevista con la capacidad existente.

Las **técnicas de tablas y gráficos** son muy populares, ya que son fáciles de entender y de utilizar. Básicamente estos planes funcionan con unas pocas variables al mismo tiempo para permitir a los planificadores comparar la demanda estimada con la capacidad existente. Son métodos de prueba y error que no garantizan un plan de producción óptimo, pero requieren sólo unos pocos cálculos sencillos y pueden ser realizados por el personal de oficina. Los métodos gráficos siguen estos cinco pasos:

1. Determinar la demanda en cada periodo.
2. Determinar la capacidad con el horario del trabajo regular, en las horas extras y la subcontratación de cada periodo.
3. Hallar los costes de la mano de obra, los de contratación, de despido y los costes de almacenamiento.
4. Considerar la política de la empresa que debe aplicarse a los trabajadores o a los niveles de existencias.
5. Desarrollar planes alternativos y examinar sus costes totales.

Estos pasos se muestran en los Ejemplos 1 a 4.

EJEMPLO 1

Representación gráfica de un plan agregado para un proveedor de materiales de construcción para tejados

Un fabricante de materiales de construcción para tejados en Juárez, México, ha efectuado la previsión de la demanda mensual de un importante producto para un periodo de 6 meses, entre enero y junio, que se presenta en la Tabla 3.2.

TABLA 3.2 ■

Mes	Demanda esperada	Días de producción	Demanda por día (calculada)
Enero	900	22	41
Febrero	700	18	39
Marzo	800	21	38
Abril	1.200	21	57
Mayo	1.500	22	68
Junio	1.100	20	55
	6.200	124	

La demanda por día se calcula dividiendo la demanda esperada por el número de días de trabajo o producción de cada mes.

Para mostrar la naturaleza del problema de planificación agregada, la empresa dibuja un gráfico (Figura 3.3) que representa la demanda por día de cada mes. La línea de puntos horizontal del gráfico representa la tasa de producción requerida para satisfacer a la demanda media durante el periodo de seis meses. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Necesidad media} = \frac{\text{Demanda total esperada}}{\text{Número de días de producción}} = \frac{6.200}{124} = 50 \text{ unidades/día}$$

Observe que, en los tres primeros meses, la demanda prevista es menor que la media, mientras que la demanda prevista en abril, mayo y junio está por encima de la media.

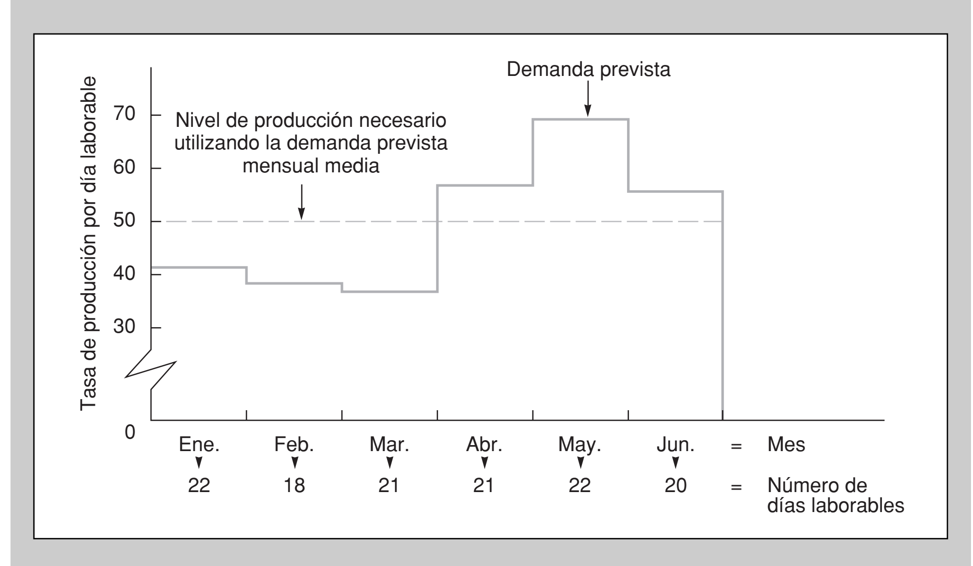


FIGURA 3.3 ■ Gráfico de la demanda prevista y de la demanda prevista media

El gráfico de la Figura 3.3 muestra cómo la previsión difiere de la demanda media. Anteriormente hemos presentado algunas estrategias para satisfacer la previsión. La empresa, por ejemplo, podría contratar personal para conseguir una tasa de producción que iguale la demanda media (indicada por la línea de puntos). O quizá podría producir una cantidad fija de, digamos, 30 unidades y subcontratar la demanda restante a otros suministradores de materiales para tejados. Un tercer plan podría consistir en combinar trabajo en horas extras con alguna subcontratación para absorber la demanda. Los Ejemplos 2, 3 y 4 muestran estas tres estrategias posibles.

EJEMPLO 2

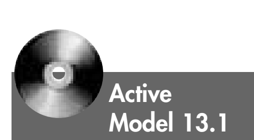
Plan 1: una plantilla constante

Una estrategia posible (llamémosla plan 1) para el fabricante descrito en el Ejemplo 1 consiste en mantener un nivel de mano de obra constante durante los seis meses. Una segunda opción (plan 2) es mantener un nivel de mano de obra constante al nivel necesario para satisfacer el mes de menor demanda (marzo), y satisfacer toda demanda por encima de este nivel subcontratando lo necesario. Tanto el plan 1 como el plan 2 responden a una estrategia de planificación nivelada y se denominan, por tanto, *estrategias niveladas*. El plan 3 consistiría en contratar y despedir empleados según sea necesario, para producir exactamente las necesidades mensuales: una *estrategia de seguimiento o caza*. La Tabla 3.3 proporciona la información de los costes necesaria para analizar estos planes.


Archivo de datos de Excel OM Ch13Ex2.xla

TABLA 3.3 ■ Información de costes

Coste de almacenamiento	5 dólares/unidad/mes
Coste de subcontratación por unidad	10 dólares/unidad
Salario medio	5 dólares/hora (40 dólares/día)
Coste de la hora extra	7 dólares/hora (más de 8 horas/día)
Horas de mano de obra para producir una unidad	1,6 horas/unidad
Coste de incrementar la tasa de producción diaria (contratación y formación)	300 dólares/unidad
Coste de disminuir la tasa de producción diaria (despidos)	600 dólares/unidad


Active Model 13.1

El Ejemplo 2 se ilustra con más detalle en el Ejercicio Active Model 13.1 del CD-ROM y en un ejercicio al final del capítulo.

Análisis del plan 1 Este método supone que se producen 50 unidades al día, que la mano de obra es constante, que no hay horas extras ni inactivas, no utilizamos stock de seguridad ni subcontratistas. La empresa acumula inventario durante un periodo de poca demanda, que va de enero a marzo, y lo agota durante la estación calurosa, que es la de demanda más alta, de abril a junio. Suponemos que el inventario inicial es igual a cero y que el inventario final planificado es igual a cero.

Mes	Producción a 50 unidades/día	Demanda estimada	Valoración mensual del inventario	Inventario final
Enero	1.100	900	+200	200
Febrero	900	700	+200	400
Marzo	1.050	800	+250	650
Abril	1.050	1.200	−150	500
Mayo	1,100	1.500	−400	100
Junio	1.000	1.100	−100	0
				1.850

Unidades totales de inventario pasadas de un mes al siguiente = 1.850 unidades
Mano de obra requerida para producir 50 unidades/día = 10 empleados

Puesto que cada unidad requiere 1,6 horas de mano de obra para su producción, cada empleado puede realizar 5 unidades en una jornada de 8 horas. Por tanto, para producir 50 unidades se requieren 10 empleados.

Los costes del plan 1 se calculan de la siguiente manera:

Costes		Cálculos
Inventario	9.250$	(= 1.850 unidades almacenadas × 5$/unidad)
Mano de obra en periodo regular	49.600$	(= 10 empleados × 40$/día × 124 días)
Otros costes (horas extras, contratación, despidos, subcontratación)	0$	
Coste total	58.850$	

El gráfico del Ejemplo 2 ya se mostró en la Figura 3.3. Algunos planificadores prefieren un gráfico *acumulado* para mostrar visualmente cómo la previsión se desvía de las necesidades medias. Observe que tanto la línea del nivel de producción como la línea de la previsión representan la misma producción total. Este gráfico puede verse en la Figura 3.4.

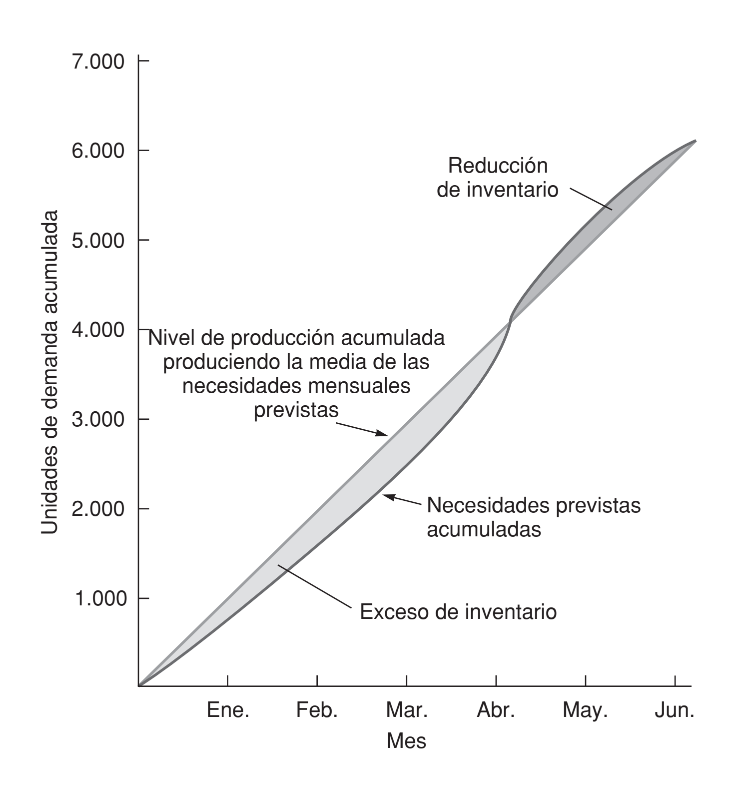


FIGURA 3.4 ■ Gráfico acumulado para el plan 1

EJEMPLO 3

Plan 2: Utilización de subcontratistas con una plantilla constante

Análisis del plan 2 Aunque en el plan 2 también se mantiene un nivel de mano de obra constante, es lo suficientemente bajo como para sólo ser capaz de hacer frente a la demanda de marzo que es de 38 unidades, el mes más bajo. Para producir 38 unidades al día en la fábrica son

necesarios 7,6 empleados. (Puede considerar que se dispone de 7 empleados a tiempo completo más uno a tiempo parcial). El *resto* de la demanda se satisface mediante subcontratación. Por tanto, hay que recurrir a la subcontratación en cualquier otro mes. En este plan no se incurre en costes de almacenamiento de inventario.

Como se necesitan 6.200 unidades durante el periodo de la planificación agregada, debemos calcular cuántas puede fabricar la empresa y cuántas deben subcontratarse.

$$\text{Producción propia} = 38 \text{ unidades/día} \times 124 \text{ días de producción} = 4.712 \text{ unidades}$$

$$\text{Unidades subcontratadas} = 6.200 - 4.712 = 1.488 \text{ unidades}$$

Los costes del plan 2 son:

Costes		Cálculos
Mano de obra de plantilla	37.696$	(= 7,6 empleados × 40$/día × 124 días)
Subcontratación	14.880$	(= 1.488 unidades × 10$/unidad)
Coste total	52.576$	

EJEMPLO 4

Plan 3: Contratación y despidos

Análisis del plan 3 La estrategia final, el plan 3, supone variar el nivel de mano de obra contratando o despidiendo según sea necesario. La tasa de producción será igual a la demanda, y para el mes de enero no hay cambio en la tasa de producción respecto al mes anterior, diciembre. La Tabla 3.4 muestra los cálculos y el coste total del plan 3. Recuerde que cuesta 600 dólares por unidad producida reducir la producción respecto al nivel diario del mes anterior, y 300 dólares por unidad cambiar para aumentar la tasa diaria de producción mediante contrataciones.

TABLA 3.4 ■ Cálculos de costes del plan 3

Mes	Previsión (unidades)	Tasa de producción diaria	Coste de la producción básica (demanda × 1,6 horas/unidad × 5$ per hora)	Coste adicional de aumentar la producción (coste de contratación)	Coste adicional de disminuir la producción (coste de los despidos)	Coste total
Enero	900	41	7.200$	—	—	7.200$
Febrero	700	39	5.600	—	1.200$ (= 2 × 600$)	6.800
Marzo	800	38	6.400	—	600 (= 1 × 600$)	7.000
Abril	1.200	57	9.600	5.700$ (= 19 × 300$)	—	15.300
Mayo	1.500	68	12.000	3.300$ (= 11 × 300$)	—	15.300
Junio	1.100	55	8.800	—	7.800$ (= 13 × 600$)	16.600$
			49.600$	9.000$	9.600$	68.200$

De este modo, el coste total para el plan 3, incluyendo producción, contratación y despidos, es de 68.200 dólares.

El último paso del método gráfico consiste en comparar los costes de cada plan propuesto y seleccionar el que tenga el menor coste total. En la Tabla 3.5 se ofrece un análi-

TABLA 3.5 ■ Comparación de los tres planes

Coste	Plan 1 (mano de obra constante de 10 empleados)	Plan 2 (mano de obra constante de 7,6 empleados más subcontrataciones)	Plan 3 (contrataciones y despidos para hacer frente a la demanda)
Costes de almacenamiento	9.250$	0$	0$
Mano de obra en horas normales	49.600	37.696	49.600
Mano de obra en horas extras	0	0	0
Contrataciones	0	0	9.000
Despidos	0	0	9.600
Subcontratación	0	14.880	0
Coste total	58.850$	52.576$	68.200$

sis resumido. Vemos que, puesto que el plan 2 es el de coste más bajo, constituye la mejor de las tres opciones.

Por supuesto, podemos considerar otras muchas estrategias posibles en problemas como éste, incluyendo combinaciones que utilicen algunas horas extras. Aunque las tablas y gráficos son una herramienta de gestión muy usada, son de utilidad para evaluar estrategias, no para crearlas. Para crear estrategias es necesario un enfoque sistemático que considere todos los costes y genere una solución eficaz.

Métodos matemáticos para la planificación

Esta sección describe brevemente algunos de los enfoques matemáticos que se han desarrollado durante los últimos 50 años para la planificación agregada.

El método del transporte de la programación lineal Cuando un problema de planificación agregada es visto como un problema de cómo asignar capacidad operativa para igualar la demanda prevista, entonces se puede formular como un problema de programación lineal. El **método del transporte de la programación lineal** no es un método de prueba y error como los métodos de tablas y gráficos, sino que proporciona un plan óptimo para minimizar los costes. Es también flexible en tanto que puede especificar la producción a efectuar en horario normal o en horas extras para cada periodo de tiempo, el número de unidades que deben ser subcontratadas, los turnos de trabajo extras y el inventario transferido de un periodo al siguiente.

El método del transporte de la programación lineal Modo de encontrar la solución óptima de un problema de planificación agregada.

En el Ejemplo 5, el suministro está compuesta por el inventario disponible y las unidades producidas en horas normales de trabajo, horas extras y mediante subcontratación. Los costes, que aparecen en la esquina superior derecha de cada celda de la matriz en la Tabla 3.7, se refieren a unidades producidas en un periodo dado o a unidades disponibles en inventario, provenientes de un periodo anterior.

EJEMPLO 5

Planificación agregada con el método del transporte

La empresa Farnsworth Tire Company recopiló una serie de datos relativos a la demanda, capacidad y costes en su planta de West Virginia. Estos datos se muestran en la Tabla 3.6:



TABLA 3.6 ■ Datos de producción, demanda, capacidad y costes de Farnsworth

	Periodo de ventas		
	Marzo	Abril	Mayo
Demanda	800	1.000	750
Capacidad			
Horas regulares	700	700	700
Horas extras	50	50	50
Subcontratación	150	150	130
Inventario inicial	100 neumáticos		

Costes	
Horas regulares	40$/neumático
Horas extras	50$/neumático
Subcontratación	70$/neumático
Costes de mantenimiento de existencias	2$ neumático/mes

La Tabla 3.7 muestra la estructura de la tabla (matriz) de transporte y una solución posible inicial.

Cuando preparamos y analizamos esta tabla debemos observar lo siguiente:

1. Los costes de almacenamiento ascienden a 2 dólares por neumático y mes. Los neumáticos producidos en un periodo y almacenados durante un mes tendrán un coste adicional de 2 dólares. Debido a que el coste de almacenamiento es lineal, dos meses de almacenamiento nos costarían 4 dólares. Por lo tanto, cuando nos movamos por una fila de izquierda a derecha, los costes de las horas de trabajo normales, de las horas extras y de las subcontratadas son menores cuando la producción se utiliza en el mismo periodo en que se ha fabricado. Si las mercancías se fabrican en un periodo y se almacenan hasta el siguiente se incurre en costes de almacenamiento. Al inventario inicial, sin embargo, normalmente se le asigna un coste unitario nulo si se utiliza para satisfacer la demanda en el periodo 1.
2. Los problemas de transporte exigen que los suministros sean iguales a la demanda. Por ello, se ha añadido una columna ficticia denominada "capacidad no utilizada". Los costes de la capacidad no utilizada son iguales a cero.
3. Debido a que el *back ordering* (la retención de pedidos) no es una alternativa viable para esta empresa en particular, no es posible producir en aquellas celdas que representan producción en un periodo para satisfacer demanda en un periodo pasado (es decir, los periodos marcados con una "X"). Si se *permitiese* la retención de pedidos (*back ordering*), para estimar los costes de retención se sumarían los costes de emergencia, las pérdidas de prestigio (*goodwill*) y la pérdida de beneficios por ventas.
4. Las cantidades en cada columna de la Tabla 3.7 indican los niveles de inventario necesarios para responder a las necesidades de la demanda. La demanda de 800 neumáticos en marzo se satisface utilizando 100 neumáticos del inventario inicial y 700 neumáticos producidos en horas normales del periodo marzo.
5. Por lo general, para completar la tabla, hay que empezar por el periodo 1 y asignar la máxima producción posible a la celda con menor coste, sin superar la capacidad no utilizada en esa fila o la demanda en esa columna. Si quedase aún demanda sin servir en esa columna, habría que asignar tanto como sea posible a la celda disponible en la columna que tuviera el coste más bajo. Después se repite este proceso para los periodos 2 y 3 (y posteriores si fuese necesario). Cuando haya acabado, la suma de todos los asientos (asignaciones) en una fila debe ser igual a la capacidad total de la fila, y la suma de todos los asientos (asignaciones) en una columna debe ser igual a la demanda para

ese periodo. (Este paso se puede llevar a cabo por el método de transporte o utilizando el programa POM para Windows o el software Excel OM).

Intente confirmar que el coste de esta solución inicial es 105.900 dólares. La solución inicial, sin embargo, no es óptima. Vea si puede encontrar un plan de producción que proporcione el menor coste posible (que asciende a 105.700 dólares) utilizando el software o manualmente.

TABLA 3.7 ■ Tabla de transporte de Farnsworth*

SUMINISTRO DE		DEMANDA DE: *Periodo 1 (Marzo)*	*Periodo 2 (Abril)*	*Periodo 3 (Mayo)*	*Capacidad no utilizada (ficticia)*	**CAPACIDAD TOTAL DISPONIBLE (oferta)**
	Inventario inicial	0 **100**	2	4	0	**100**
Periodo 1	*Horas normales*	40 **700**	42	44	0	**700**
Periodo 1	*Horas extras*	50	52 **50**	54	0	**50**
Periodo 1	*Horas subcontratadas*	70	72 **150**	74	0	**150**
Periodo 2	*Horas normales*	×	40 **700**	42	0	**700**
Periodo 2	*Horas extras*	×	50 **50**	52	0	**50**
Periodo 2	*Horas subcontratadas*	×	70 **50**	72	0 **100**	**150**
Periodo 3	*Horas normales*	×	×	40 **700**	0	**700**
Periodo 3	*Horas extras*	×	×	50 **50**	0	**50**
Periodo 3	*Horas subcontratadas*	×	×	70	0 **130**	**130**
DEMANDA TOTAL		**800**	**1.000**	**750**	**230**	**2.780**

* Las celdas con x indican que no se utiliza la retención de pedidos (*back orders*) en Farnsworth. Cuando utilicemos Excel OM o POM para Windows, se debe asignar un coste muy alto (por ejemplo, 9.999) a cada celda que no se utiliza para producción.

El método del transporte de programación lineal descrito en el ejemplo anterior fue formulado originalmente por E. H. Bowman en 1956. Aunque funciona correctamente cuando se analizan los efectos de mantener inventarios, utilizar horas extras y subcontratar, no funciona cuando se introducen factores negativos o no lineales. En consecuencia, cuando se introducen otros factores como las contrataciones o los despidos, se debe utilizar el método más general de la programación lineal (Algoritmos Simples).

Modelo de los coeficientes de gestión
Modelo de planificación formal construido alrededor de la experiencia y eficacia del directivo.

Modelo de los coeficientes de gestión El **modelo de los coeficientes de gestión** de Bowman [1] constituye un modelo de decisión formal basado en las experiencias y en la eficacia de un directivo. La hipótesis es que si la actuación pasada de un director ha sido bastante buena, entonces puede ser utilizada como base para futuras decisiones. Este modelo utiliza un análisis de regresión de las decisiones de producción pasadas tomadas por los directivos. La línea de regresión proporciona la relación entre las variables (tales como demanda y mano de obra) para decisiones futuras. Según Bowman, las deficiencias de los directivos son la mayoría de las veces inconsistencias en la toma de decisiones.

Otros modelos Otros dos modelos de planificación agregada son la regla de decisión lineal y la simulación. La *regla de decisión lineal* (LDR: *Linear Decision Rule*) trata de especificar una tasa de producción y un nivel de mano de obra óptimos durante un periodo específico. Minimiza los costes totales de nómina, contratación, despidos, horas extras e inventarios mediante series de curvas de coste cuadráticas[2].

Un modelo informático denominado *planificación mediante simulación* utiliza un procedimiento de búsqueda para hallar la combinación de valores de mano de obra y tasa de producción que proporcione un coste mínimo.

Comparación de los métodos de planificación agregada

Aunque estos modelos matemáticos han sido desarrollados por investigadores para trabajar bien en ciertas condiciones, y la programación lineal ha encontrado cierta aceptación en la industria, el hecho es que los modelos de planificación más sofisticados no son muy utilizados. ¿Por qué? Quizá esto refleja la postura del directivo medio sobre que el o ella considera estos modelos demasiado complejos. A los planificadores, como a todos nosotros, nos gusta comprender cómo y por qué funcionan los modelos en los que se basan nuestras decisiones importantes. Además, los directores de operaciones necesitan tomar decisiones rápidas en función de la cambiante dinámica del centro de trabajo, y la creación de buenos modelos requiere su tiempo. Esto puede explicar por qué son más generalmente aceptados los métodos más simples de las tablas y gráficos.

La Tabla 3.8 destaca algunas de las principales características de los modelos de planificación de gráficos y tablas, de transporte y de los coeficientes de gestión.

TABLA 3.8 ■ Resumen de los tres métodos de planificación agregada más importantes

Técnica	Enfoque de resolución	Aspectos importantes
Métodos de tablas y gráficos	Prueba y error	Sencillos de entender y fáciles de utilizar. Muchas soluciones posibles; la elegida puede no ser óptima
Método del transporte de programación lineal	Optimización	Software de programación lineal disponible; permite análisis de sensibilidad y nuevas restricciones; las funciones lineales pueden no ser reales.
Modelos de los coeficientes de gestión	Heurístico	Sencillo, fácil de llevar a cabo; trata de imitar el proceso de decisión del directivo; utiliza la regresión.

[1] E. H. Bowman, "Consistency and Optimality in Managerial Decision Making", *Management Science* 9, n.º 2 (enero de 1963): pp. 310-321.

[2] Puesto que la LDR fue desarrollada por Charles C. Holt, Franco Modigliani, John F. Muth y el ganador del premio Nobel Herbert Simon, se conoce comúnmente como la regla HMMS. Para más detalles, véase Martin K. Starr, *Production and Operations Management* (Cincinnati, Ohio: Atomic Dog Publishing, 2004): pp. 490-493.

PLANIFICACIÓN AGREGADA EN SERVICIOS

Algunas organizaciones del sector servicios realizan la planificación agregada exactamente de la misma manera como la hemos desarrollado en los Ejemplos 1 a 5 de este capítulo, pero con la gestión de la demanda tomando un papel más activo. Debido a que la mayoría de las empresas de servicios llevan a cabo combinaciones de las ocho opciones de capacidad y demanda vistas anteriormente, suelen utilizar estrategias mixtas de planificación agregada. En realidad, en industrias como banca, transportes o comida rápida, la planificación agregada puede ser más sencilla que en las manufacturas.

El control del coste de la mano de obra en las empresas de servicios es esencial[3] e implica:

1. Una planificación cuidadosa de las horas de trabajo de los empleados para asegurar una respuesta rápida a la demanda de los clientes.
2. Alguna forma de recurso mano de obra "de guardia" que pueda ser añadido, si hace falta, o no utilizado, si no hace falta, para afrontar una demanda inesperada.
3. Flexibilidad en las habilidades de los empleados individualmente que permita la reasignación de la mano de obra disponible.
4. Flexibilidad de los empleados individualmente en cuanto a su nivel de output o de horas de trabajo para afrontar una mayor demanda.

Estas opciones pueden parecer exigentes, pero no son raras en el sector servicios, donde la mano de obra es el principal recurso en la planificación agregada. Por ejemplo:

- Se utiliza exceso de capacidad en las agencias inmobiliarias y en los concesionarios de automóviles para proporcionar tiempo de estudio y de planificación a los vendedores.
- Los cuerpos de bomberos y policía llaman a personal que no está de servicio en el caso de emergencias importantes. Cuando la emergencia es duradera, el personal de la policía o de los bomberos puede trabajar más horas de las normales y turnos extras.
- Cuando la actividad es inesperadamente baja, los restaurantes y las tiendas al por menor envían al personal a casa antes.
- Los administrativos de almacén en los supermercados trabajan como cajeros cuando las colas son demasiado largas.
- Las camareras más experimentadas aumentan su ritmo y eficiencia de servicio cuando llegan oleadas de clientes.

Los planteamientos de planificación agregada difieren según el tipo de servicio proporcionado. A continuación desarrollamos cinco escenarios de servicio.

Restaurantes

En un negocio con una demanda muy variable, como es el caso de un restaurante, la planificación agregada intenta (1) alisar la tasa de producción y (2) determinar el tamaño de la plantilla que hay que emplear. El enfoque general normalmente requiere producir muy pequeños niveles de inventario durante los periodos de demanda débil y agotar el inventario en los periodos punta de demanda, pero utilizando la mano de obra para adaptarse a la

[3] Glenn Bassett, *Operations Management for Service Industries* (Westport, CT: Quorum Books, 1992): p. 77.

mayoría de los cambios en la demanda. Como esto es muy parecido a lo que ocurre en las empresas manufactureras, los métodos tradicionales de planificación agregada se pueden aplicar también a los servicios. Una diferencia que hay que tener en cuenta es que incluso reducidas cantidades de inventario pueden ser perecederas. Además, los plazos pueden ser mucho más pequeños que en las empresas manufactureras. Por ejemplo, en los restaurantes de comida rápida, los periodos bajos y altos de demanda pueden medirse en horas, y el "producto" puede estar almacenado como mucho unos 10 minutos.

Hospitales

Los hospitales hacen frente a los problemas de planificación agregada asignando dinero, personal y suministros para satisfacer las demandas de los pacientes. El hospital Henry Ford de Michigan, por ejemplo, planifica su capacidad de camas y necesidades de personal en función de una previsión de "carga" de pacientes, obtenida a través de medias móviles. El necesario enfoque a mano de obra de su plan agregado ha llevado a la creación de un nuevo *pool* de personal flotante que sirve a las diferentes áreas de enfermería.

Cadenas nacionales de pequeñas empresas de servicios

Con la llegada de las cadenas nacionales de pequeños negocios de servicios, tales como funerarias, talleres de engrase y cambio de aceite rápido para automóviles, centros de fotocopias e imprenta, y tiendas de informática, una cuestión sobre la que se ha de decidir es si se ha de adoptar un enfoque de planificación agregada para toda la cadena o de planificación independiente para cada establecimiento. Tanto las ventas como las compras pueden planificarse de forma centralizada cuando se puede influir sobre la demanda mediante promociones especiales. Este enfoque de planificación agregada es ventajoso, porque reduce los costes de compra y publicidad y ayuda a gestionar los flujos de caja en cada local.

Servicios varios

La mayoría de los servicios "varios" –financieros, transportes, y muchos servicios de comunicación y recreativos– ofrecen un producto intangible. La planificación agregada de estos servicios trata principalmente de la planificación de las necesidades de recursos humanos y de la gestión de la demanda. El doble objetivo es allanar los picos de demanda y diseñar métodos para utilizar completamente los recursos de mano de obra durante los periodos de baja demanda. El Ejemplo 6 ilustra este tipo de plan para un bufete de abogados.

Industria aérea

Las compañías aéreas y las empresas de alquiler de automóviles tienen problemas específicos de planificación agregada. Consideremos el caso de una compañía aérea con sus oficinas centrales en Nueva York, dos centros de operaciones (*hubs*) en ciudades como Atlanta y Dallas, y 150 oficinas en aeropuertos de todo el país (Estados Unidos). Esta planificación es considerablemente más compleja que la planificación agregada de una única instalación o, incluso, de un conjunto de instalaciones independientes.

La planificación agregada en esta industria consiste en realizar cuadros o programas de (1) número de vuelos que entran y salen de cada centro de operaciones; (2) número de vuelos en todas las rutas; (3) número de pasajeros a atender en todos los vuelos; (4) personal de vuelo y personal de tierra necesario en cada centro de operaciones y aeropuerto;

EJEMPLO 6

Planificación agregada en un bufete de abogados

Klasson y Avalon, un bufete de abogados de tamaño medio de Tampa con 32 abogados, ha desarrollado una previsión a tres meses vista para 5 tipos de asuntos legales (*véase* la columna 1 de la Tabla 3.9). Suponiendo una semana laboral de 40 horas y que se factura el cien por cien de las horas de cada abogado, se dispone de cerca de 500 horas facturables por cada abogado durante este trimestre fiscal. Se han hecho previsiones para el trimestre de las necesidades de horas de tiempo facturable en tres escenarios posibles de demanda (en el mejor, en el más probable y en el peor de los escenarios) y para 5 tipos de áreas legales (columnas 2, 3 y 4). A continuación, se divide por 500 para obtener la cantidad de abogados necesarios para cubrir el negocio estimado. Se necesitarían entre 30 y 39 abogados para cubrir las variaciones en el nivel de negocio entre los peores o mejores niveles de demanda (por ejemplo, el mejor escenario posible de 19.500 horas, dividas por 500 horas por abogado, da 39 abogados necesarios).

TABLA 3.9 ■ Distribución de personal en Klasson y Avalon, Abogados; Previsiones para el próximo trimestre (1 abogado = 500 horas de trabajo)

	Horas de trabajo necesarias			Restricciones de capacidad	
(1) Área legal	(2) Mejor de los escenarios (horas)	(3) Escenario probable (horas)	(4) Peor de los escenarios (horas)	(5) Máxima demanda de abogados	(6) Número de abogados cualificados
Juicios	1.800	1.500	1.200	3,6	4
Investigación legal	4.500	4.000	3.500	9,0	32
Derecho de sociedades	8.000	7.000	6.500	16,0	15
Legislación inmobiliaria	1.700	1.500	1.300	3,4	6
Derecho penal	3.500	3.000	2.500	7,0	12
Horas totales	19.500	17.000	15.000		
Abogados necesarios	39	34	30		

Puesto que los 32 abogados de Klasson y Avalon están cualificados para realizar la investigación legal básica, esta área tiene la máxima flexibilidad de planificación (columna 6). Las dos áreas más especializadas (y con más restricciones de capacidad) son los juicios y el derecho de sociedades. En estas áreas, en el mejor de los escenarios de demanda previstos apenas podría cubrir el trabajo en el área de juicios ya que la necesidad de abogados es de 3,6 abogados (*véase* la columna 5) y sólo dispone de 4 abogados cualificados (columna 6) para efectuar este trabajo. Mientras que en el área de derecho de sociedades falta una persona. Se podrían utilizar horas extras para cubrir el exceso este trimestre, pero si el negocio crece, sería necesario contratar o desarrollar personal actual en ambas áreas. La legislación inmobiliaria y el derecho penal están adecuadamente cubiertos por el personal disponible, siempre que otras necesidades no utilicen su exceso de capacidad.

Con su actual equipo de 32 abogados, la mejor previsión de Klasson y Avalon aumentaría la carga de trabajo en un 20 por ciento (suponiendo que no haya nuevas contrataciones). Esto representa un día extra de trabajo por abogado y semana. En el peor de los escenarios de demanda resultaría un 6 por ciento de infrautilización del personal. Para ambos escenarios, la empresa ha determinado que la actual plantilla podrá dar un servicio adecuado.

Fuente: Adaptado de Glenn Bassett, *Operations Management for Service Industries* (Westport, CT: Quorum Books, 1992): 110.

y (5) determinar el número de asientos a asignar a cada clase de tarifa. Las técnicas para calcular la asignación de asientos se denomina *yield management* o gestión de ingresos, tema que abordaremos a continuación.

YIELD MANAGEMENT

Yield management (o gestiónde los ingresos) Decisiones sobre la capacidad que determinan la asignación de diferentes tipos de recursos para maximizar el beneficio o la producción.

El **yield management** (o **gestión de los ingresos**) es el proceso de planificación agregada que asigna recursos a los clientes a un precio que logrará maximizar los ingresos de la empresa. Su utilización se remonta a la década de 1980 cuando el sistema de reservas de American Airlines (denominado SABRE) permitía que la compañía aérea alterase los precios de los billetes, en tiempo real y en cualquier ruta, en función de la información sobre la demanda. Si parecía que la demanda para asientos caros era baja, se ofrecían más asientos de tarifa económica. Si la demanda de asientos de tarifa completa era elevada, se reducía el número de asientos destinados a la tarifa económica.

El éxito de American Airlines en la gestión de los ingresos llevó a otras muchas empresas e industrias a adoptar el concepto. En la industria hotelera el *yield management* comenzó a aplicarse a finales de la década de 1980 en Marriott International, que ahora publica unos beneficios adicionales de 400 millones anuales gracias a su gestión de los ingresos. Su competidora, la cadena de hoteles Ovni, utiliza un software que hace más de 100.000 cálculos todas las noches en cada hotel. Por ejemplo, el hotel Dallas Ovni, en esa ciudad, cobra ahora sus tarifas más altas (unos 199 dólares) durante los días laborables, pero aplica importantes descuentos (rebajas hasta los 59 dólares) los fines de semana. Su homólogo en San Antonio, que está en un destino más turístico, aplica la política opuesta, ofreciendo precios más rebajados los días laborales. El recuadro sobre *Dirección de producción en acción* denominado "Yield Management en Hertz" describe esta práctica en la industria del alquiler de automóviles.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

YIELD MANAGEMENT EN HERTZ

Durante más de 90 años, Hertz ha estado alquilando automóviles por una cantidad fija al día. Sin embargo, durante las dos últimas décadas se ha producido un aumento significativo de la demanda generado por los viajeros en avión por motivos de negocios. Como el mercado de alquiler de vehículos ha cambiado y se ha hecho maduro, Hertz ha ofrecido más opciones, como la de permitir a los clientes recoger y devolver el vehículo en diferentes localizaciones. Esta opción ha creado exceso de capacidad en algunas ciudades y escasez en otras.

Estas carencias y excesos alertaron a Hertz sobre la necesidad de disponer de un sistema de gestión de ingresos (*yield management*) análogo a los utilizados por las compañías aéreas. El sistema se usa para fijar precios, regular el movimiento de automóviles y, finalmente, determinar la disponibilidad de automóviles en cada localización. Mediante una investigación, Hertz descubrió que diferentes ciudades y localizaciones de ciudades alcanzaban sus picos de demanda en diferentes días de la semana. Por lo tanto, los automóviles se trasladaban desde las localizaciones donde la demanda era baja a las localizaciones de mayor demanda. Alterando tanto el precio como la cantidad de automóviles en diferentes localizaciones, Hertz ha podido incrementar el número de alquileres y aumentar los ingresos.

El sistema de *yield management* es utilizado, fundamentalmente, por los directivos regionales y locales para gestionar de mejor forma los cambios en la demanda en el mercado norteamericano. El plan de Hertz para conseguir que este sistema sea global se enfrenta, sin embargo, a importantes retos en el extranjero, donde son frecuentes las restricciones al movimiento de automóviles vacíos entre fronteras.

Fuentes: Cornell Hotel and Restaurant Quarterly (diciembre de 2001): 33-46; y *The Wall Street Journal* (3 de marzo de 2000): W-4.

Las organizaciones que tienen *inventario "perecedero"*, como las compañías aéreas, los hoteles, las compañías de alquiler de automóviles, los cruceros e, incluso, las compañías de suministro eléctrico, tienen las siguientes características comunes que hacen que el *yield management* sea una opción interesante para ellas[4].

1. Se puede vender el servicio o producto antes de su consumo.
2. La demanda fluctúa.
3. La capacidad es relativamente fija.
4. Se puede segmentar la demanda.
5. Los costes variables son bajos y los costes fijos elevados.

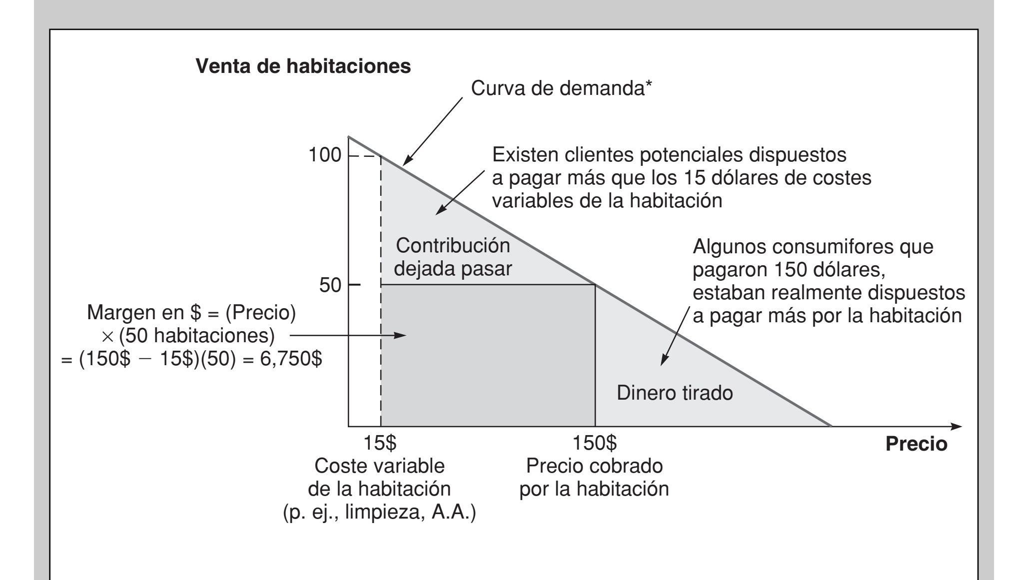
El Ejemplo 7 ilustra cómo funciona el *yield management* en un hotel.

EJEMPLO 7

Yield management

El hotel Cleveland Downtown Inn es un hotel de 100 habitaciones que históricamente ha cobrado un precio fijo de 150 dólares por habitación y noche. El coste variable de que una habitación esté ocupada es bajo. La dirección considera que los gastos por limpieza, aire acondicionado y los pequeños costes de jabón, champú, etcétera, ascienden a 15 dólares por habitación y noche. Las ventas son en media de 50 habitaciones por noche. La Figura 3.5 muestra el actual esquema de precios. Las ventas netas ascienden a 6.750 dólares por noche con un único precio.

Sin embargo, podemos observar en la citada figura que algunos huéspedes hubieran estado dispuestos a gastar más de 150 dólares por habitación: "dinero tirado". Otros hubieran estado dispuestos a pagar más que el coste variable de 15 dólares, pero menos que 150: "contribución dejada pasar".



* El precio, en este modelo, se supone "elástico", es decir, las ventas responden a las variaciones en los precios. Una variación en la demanda está causada por una variación en el precio. Se dice que un producto es "inelástico" si un precio más alto del mismo no afecta a su demanda.

FIGURA 3.5 ■ El hotel fija sólo un precio

[4] R. Oberwetter, "Revenue Management", *OR/MS Today* (junio de 2001): pp. 41-44.

En la Figura 3.6 el hotel decide fijar *dos* niveles de precios. Estima, utilizando un software de gestión de ingresos que está disponible ampliamente en el mercado, que se pueden vender 30 habitaciones por noche a 100 dólares, y otras 30 a 200 dólares. El beneficio total asciende ahora a 8.100 dólares (2.550 de las habitaciones a 100 dólares y 5.550 de las habitaciones a 200 dólares). Es posible que haya que fijar incluso más precios distintos para el hotel Cleveland Downtown Inn.

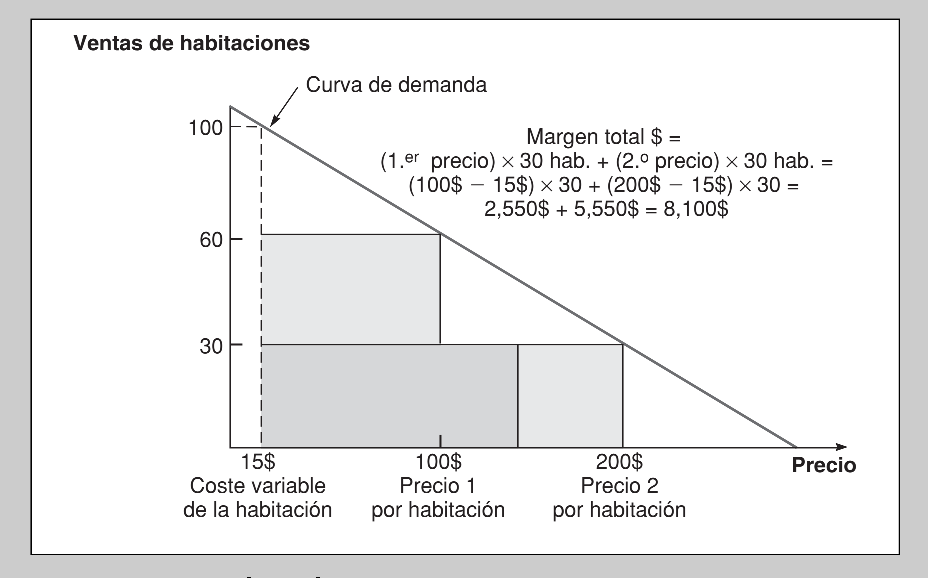


FIGURA 3.6 ■ Hotel con dos precios

Las industrias que tradicionalmente se han asociado con la gestión de ingresos actúan en el cuadrante 2 de la Figura 3.7. Pueden aplicar una política de precio variable a su producto y controlar la utilización o disponibilidad del producto (número de asientos en una compañía aérea o de habitaciones de un hotel vendidas a tarifa reducida). Por otro lado, los cines, las salas de conciertos o los centros de exposiciones (cuadrante 1) tienen menor

FIGURA 3.7 ■ Matriz del *yield management*

Las industrias en el cuadrante 2 se han asociado tradicionalmente con la gestión de los ingresos.

Fuente: Adaptado de S. Kimes y K. McGuire, "Function Space Revenue Management", *Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly* 42, n.º 6 (diciembre de 2001): 33-46.

		Precio	
		Tiende a ser fijo	Tiende a ser variable
Duración del uso	Uso prececible	Cuadrante 1: Salas de cine Salas de concierto centros de convenciones Salas de reuniones en un hotel	Cuadrante 2: Hoteles Compañías aéreas Alquiler de automóviles Líneas de cruceros
	Uso impredecible	Cuadrante 3: Restaurantes Campos de golf Proveedores de servicios de Internet	Cuadrante 4: Hospitales de atención continua

flexibilidad para establecer precios pero siguen utilizando la hora (sesión matinal o por la noche) y la situación en la sala (patio de butacas, lateral o piso superior) para gestionar sus ingresos. En ambos casos, la dirección tiene el control sobre la cantidad de recurso utilizado (la duración del recurso), tal como un asiento para dos horas.

En la mitad inferior de la figura la tarea del director es más difícil porque la duración del uso del recurso es menos controlable. Sin embargo, con imaginación, los directivos están utilizando el exceso de capacidad, incluso en estas industrias. Por ejemplo, un campo de golf puede vender las horas menos deseables de inicio de recorrido a una tarifa reducida, y un restaurante puede tener un especial "madrugadores" para generar negocio antes de la hora de comida habitual.

Para que funcione el *yield management*, la empresa necesita gestionar tres temas:

1. Debe ser factible disponer de ***múltiples estructuras de precios*** que deben resultar lógicas (y, preferiblemente, justas) al cliente. Esta justificación puede adoptar diversas formas; por ejemplo, los asientos de primera clase en un avión, o la hora de inicio preferida en un campo de golf (*véase* el Dilema ético al final de este capítulo).
2. ***Previsiones del uso y de la duración del uso.*** ¿Cuántos asientos de clase económica debe haber disponibles? ¿Cuánto más pagarán los clientes por una habitación con vistas al mar?
3. ***Cambios en la demanda.*** Esto significa que hay que gestionar el mayor uso a medida que se vende más capacidad. También significa que hay que abordar los problemas que surgen porque la estructura de precios puede no parecer lógica y justa para todos los clientes. Finalmente, significa que hay que gestionar nuevos problemas, como el *overbooking* porque la previsión no fue perfecta.

RESUMEN

La planificación agregada ofrece a las empresas un arma necesaria para ayudarlas a captar cuota de mercado en la economía global. El plan agregado proporciona, tanto a las empresas manufactureras como a las empresas de servicios, la capacidad de responder a las variaciones en la demanda de los clientes, mientras sigue produciendo a bajo coste y con altos niveles de calidad.

El plan agregado establece los niveles de inventario, producción, subcontratación y empleo en un horizonte a medio plazo, normalmente de 3 a 18 meses. Este capítulo describe diferentes técnicas de planificación agregada, que abarcan desde el popular enfoque de gráficos y tablas hasta una variedad de modelos matemáticos como la programación lineal.

El plan agregado es una importante responsabilidad de un director de operaciones y una clave para una producción eficiente. El output del plan agregado da lugar a un programa maestro de producción más detallado, que es la base para la desagregación, programación de los talleres, y los sistemas de planificación de necesidades de materiales (MRP).

Los planes agregados de las empresas manufactureras y de las empresas de servicios son similares. Los restaurantes, compañías aéreas y hoteles son todos ellos sistemas de servicio que emplean planes agregados y que tienen una oportunidad de implementar el *yield management*. Pero, independientemente de la industria o del método de planificación, el tema más importante es la aplicación del plan. A este respecto, los directivos parecen sentirse más cómodos con enfoques de planificación más rápidos, menos complejos y menos matemáticos.



Planificación agregada (o programación agregada) *(p. 111)*
Decisiones de planificación *(p. 111)*
Desagregación *(p. 113)*
Plan (Programa) maestro de producción *(p. 113)*
Estrategia de seguimiento o de caza *(p. 117)*
Planificación nivelada o estable *(p. 118)*
Estrategia mixta *(p. 118)*
Técnicas de gráficos y tablas *(p. 118)*
Métodos del transporte de la programación lineal *(p. 123)*
Modelo de los coeficiente de gestión *(p. 126)*
Yield management o Gestión de los ingresos *(p. 130)*

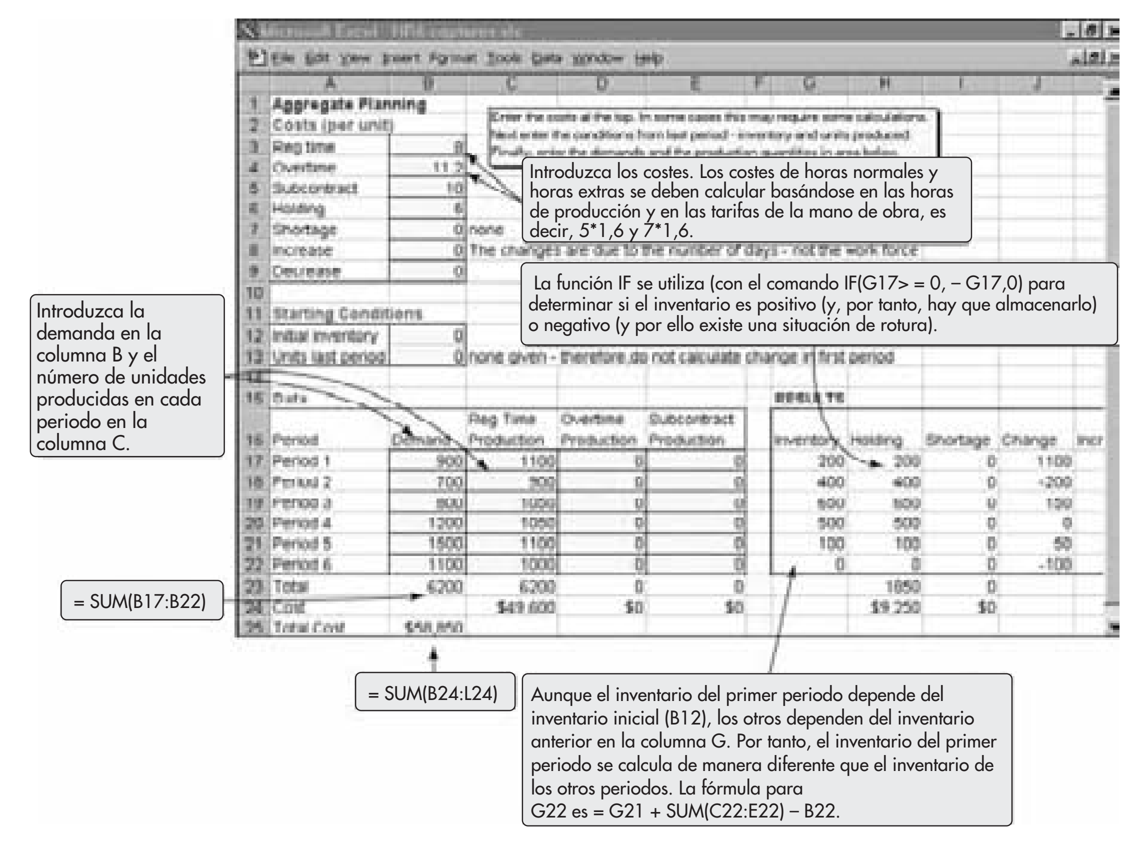
CÓMO UTILIZAR SOFTWARE PARA PLANIFICACIÓN AGREGADA

Esta sección ilustra la utilización de Excel OM y de POM para Windows en la planificación agregada.



Cómo utilizar Excel OM

El módulo de Planificación Agregada de Excel OM puede verse en el Programa 3.1. Utilizando de nuevo los datos del Ejemplo 2, el Programa 3.1 muestra los datos de partida y algunas de las fórmulas utilizadas para calcular los costes de las horas de trabajo norma-



PROGRAMA 3.1 ■ Cómo utilizar Excel OM para la planificación agregada, con los datos del Ejemplo 2

les, horas extras, subcontratación, almacenamiento, desabastecimiento e incrementos o decrementos de la producción. El usuario debe proporcionar el plan de producción para que Excel OM realice su análisis.



Cómo utilizar POM para Windows

El módulo de planificación agregada de POM para Windows efectúa la planificación agregada o de producción para hasta 90 periodos. Dada la demanda para futuros periodos, podemos realizar varios planes para determinar el de menor coste, basándonos en los costes de almacenamiento, rotura, producción y cambios. Existen cuatro métodos para realizar la planificación. Se puede encontrar más ayuda acerca de cada uno de ellos una vez que lo hemos elegido. *Véase* el Apéndice IV para una información más detallada.



PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto 3.1

El fabricante de materiales para tejados descrito en los Ejemplos 1 a 4 de este capítulo desearía considerar aún una cuarta estrategia de planificación (plan 4), que mantiene una mano de obra constante de ocho personas y utiliza las horas extras cuando sea necesario para hacer frente a la demanda. Utilice la información de costes de la Tabla 3.3. De nuevo, suponga que los inventarios iniciales y finales son iguales a cero.

Solución

Emplee ocho empleados y utilice horas extras cuando se necesitan. Tenga en cuenta que en este plan surgirán costes de almacenamiento.

Mes	Producción de 40 unidades/día	Inventario a principio de mes	Demanda prevista para este mes	Producción necesaria en horas extras	Inventario final
Enero	880	—	900	20 unidades	0 unidades
Febrero	720	0	700	0 unidades	20 unidades
Marzo	840	20	800	0 unidades	60 unidades
Abril	840	60	1.200	300 unidades	0 unidades
Mayo	880	0	1.500	620 unidades	0 unidades
Junio	800	0	1.100	300 unidades	0 unidades
				1.240 unidades	80 unidades

Costes totales de almacenamiento = 80 unidades × 5 dólares/unid./mes = 400 dólares

Salario normal:

8 empleados × 40 dólares/día × 124 días = 39.680 dólares

Para producir 1.240 unidades al coste de horas extras (de 7$/hora) se necesitan 1.984 horas.

Costes por horas extras = 7 dólares/hora × 1.984 horas = 13.888 dólares

PLAN 4

Costes (plantilla de 8 + horas extras)		
Costes de almacenamiento	400$	(80 unidades almacenadas × 5$/unidad)
Horas de trabajo normales	39.680	(8 empleados × 40$/día × 124 días)
Horas extras	13.888	(1.984 horas × 7$/hora)
Contratación o despidos	0	
Subcontratación	0	
Costes totales	53.968$	

Problema Resuelto 3.2

Una planta de Dover, Delaware, ha preparado los datos de producción, demanda, costes e inventario que se muestran a continuación. La empresa tiene una mano de obra constante y satisface toda su demanda. Asigne la capacidad de producción para satisfacer la demanda al mínimo coste. ¿Cuál es el coste de este plan?

Capacidad de producción disponible (en unidades)

Periodo	Horas regulares	Horas extras	Subcontratación
1	300	50	200
2	400	50	200
3	450	50	200

Previsión de la demanda

Periodo	Demanda (unidades)
1	450
2	550
3	750

Otros datos

Inventario inicial	50 unidades
Coste por unidad en horas regulares	50 dólares
Coste por unidad en horas extras	65 dólares
Coste por unidad de subcontratación	80 dólares
Coste de almacenamiento por unidad y periodo	1 dólar
Coste de pedidos por unidad y periodo	4 dólares

Solución

(Coste unitario entre corchetes; cantidad asignada a continuación.)

SUMINISTRO DE		DEMANDA DE *Periodo 1*	*Periodo 2*	*Periodo 3*	*Capacidad no utilizada (ficticia)*	CAPACIDAD TOTAL DISPONIBLE (oferta)
Inventario inicial		[0] 50	[1]	[2]	[0]	50
Periodo 1	*Horario habitual*	[50] 300	[51]	[52]	[0]	300
	Horas extras	[65] 50	[66]	[67]	[0]	50
	Horas subcontratadas	[80] 50	[81]	[82]	[0] 150	200
Periodo 2	*Horario habitual*	[54]	[50] 400	[51]	[0]	400
	Horas extras	[69]	[65] 50	[66]	[0]	50
	Horas subcontratadas	[84]	[80] 100	[81] 50	[0] 50	200
Periodo 3	*Horario habitual*	[58]	[54]	[50] 450	[0]	450
	Horas extras	[73]	[69]	[65] 50	[0]	50
	Horas subcontratadas	[88]	[84]	[80] 200	[0]	200
DEMANDA TOTAL		450	550	750	200	1.950

Coste del plan:

Periodo 1:	50(0$) + 300(50$) + 50(65$) + 50(80$)	= 22.250$
Periodo 2:	400(50$) + 50(65$) + 100(80$)	= 31.250$
Periodo 3:	50(81$) + 450(50$) + 50(65$) + 200(80$)	= 45.800$
	Coste total	99.300$

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.


En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Visita virtual a una empresa
- Problemas en Internet
- Casos de estudio en Internet

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Ejercicios Active Model
- Excel OM
- Archivos de datos para ejemplos de Excel OM
- POM para Windows

CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. Defina la planificación agregada.
2. Explique lo que significa el término *agregada* en la expresión "planificación agregada".
3. Enumere los objetivos estratégicos de la planificación agregada. ¿Cuál de estos objetivos se suele abordar más a menudo con las técnicas cuantitativas de la planificación agregada? ¿Cuál de ellos suele ser el más importante?
4. Defina la estrategia de seguimiento o caza.
5. ¿Qué es una estrategia pura? Ofrezca algunos ejemplos.
6. ¿Qué es la planificación nivelada o estable? ¿En qué consiste su filosofía subyacente?
7. Defina la estrategia mixta. ¿Por qué recurriría una empresa a una estrategia mixta en vez de a una sencilla estrategia pura?
8. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de variar el tamaño de la plantilla para satisfacer la demanda de cada periodo?
9. ¿Por qué no se utilizan más los modelos matemáticos en la planificación agregada?
10. ¿En qué difiere la planificación agregada en los servicios de la planificación agregada en las manufacturas?
11. ¿Cuál es la relación entre el plan agregado y el programa (plan) maestro de producción?
12. ¿Por qué son útiles los métodos de planificación agregada gráficos?
13. ¿Cuáles son las principales limitaciones de utilizar el método de transporte en la planificación agregada?
14. ¿Cómo afecta el *yield management* al plan agregado?

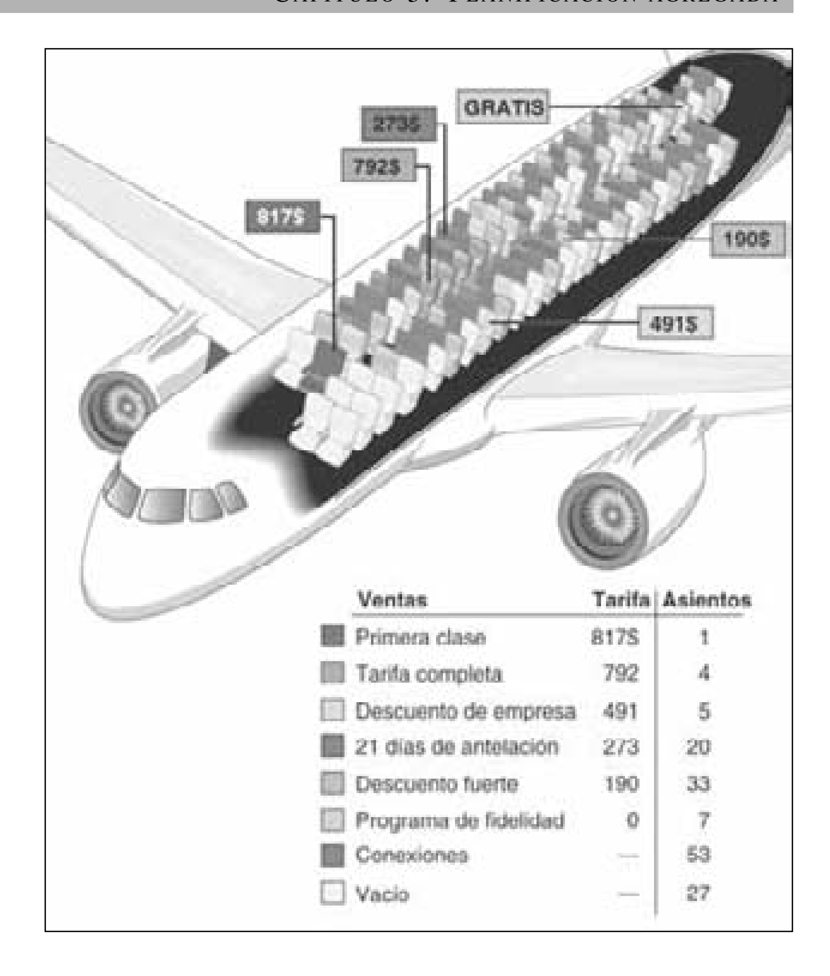


DILEMA ÉTICO

Los pasajeros de las compañías aéreas hacen largas colas, se los apiña en pequeños asientos en aviones la mayoría de las veces llenos, y a menudo pasan horas en salas de espera debido a problemas en el tráfico aéreo o a la falta de puertas de embarque. Pero lo que hace renegar a los viajeros casi tanto como estas molestias es descubrir que la persona que está sentada a su lado pagó mucho menos que ellos por su billete. Este concepto de *yield management*, o "gestión de los ingresos", se traduce en un precio de billetes que va desde ser gratis a miles de dólares para un mismo avión. La Figura 3.8 muestra lo que pagaron recientemente los pasajeros por diversos billetes en el vuelo de las 11:35 horas de Minneapolis a Anaheim, California, en un Airbus A320.

Dé argumentos a favor y en contra de este sistema de fijación de precios. ¿Cree que el público en general acepta este sistema de *yield management*? ¿Qué ocurriría si oyera por casualidad a la persona que está delante de usted en la cola de registro que ha pagado una tarifa más baja que la suya por una habitación en el hotel Hilton? ¿Cómo pueden los clientes manipular los sistemas de las compañías aéreas para obtener una tarifa más barata?

FIGURA 3.8 ■ Coste de los pasajes con yield management en un típico vuelo

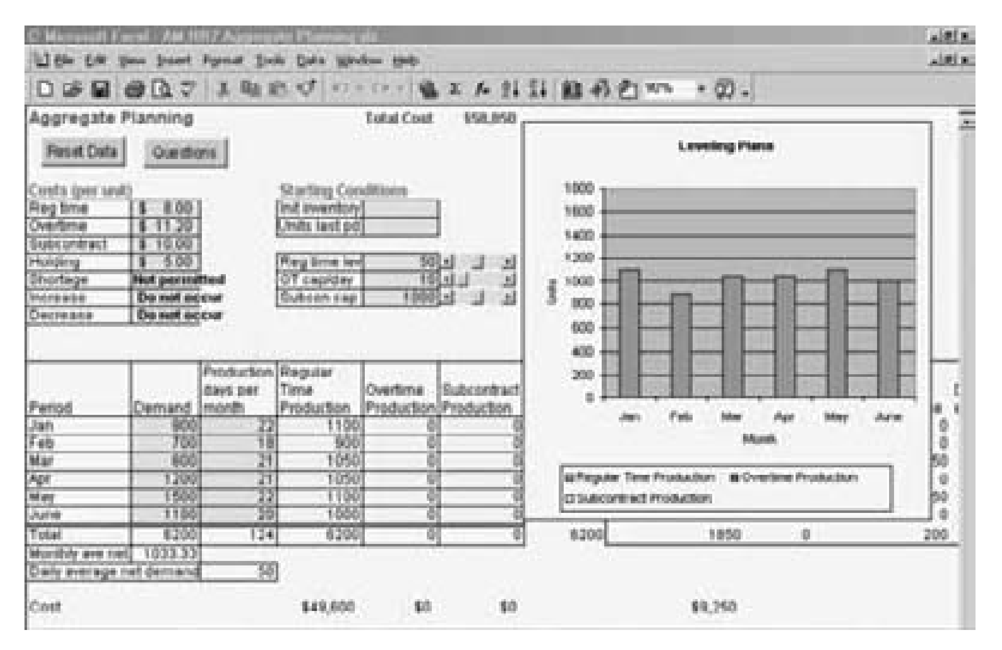


EJERCICIO ACTIVE MODEL

Este ejercicio Active Model contiene un problema de planificación agregada a seis meses utilizando una estrategia de planificación nivelada. Puede utilizar las barras de desplazamiento para ajustar el nivel base de producción diaria durante el mes, la cantidad de horas extras diarias y la cantidad de subcontratación. Observe que las fórmulas están definidas de forma que se opta por la subcontratación antes que por las horas extras puesto que en este ejemplo el coste de la subcontratación por unidad es inferior al coste de las horas extras por unidad.

Preguntas

1. Cada trabajador fabrica cinco unidades al día. Si el número de trabajadores se reduce de 10 a 9, disminuyendo la capacidad diaria, ¿qué pasa con el coste?
2. ¿Qué nivel de horas normales minimiza el coste total?
3. ¿Hasta qué nivel puede llegar la capacidad diaria en horas normales antes de que haya que recurrir a las horas extras?
4. ¿Hasta qué nivel puede llegar la capacidad diaria en horas normales antes de que no haya suficiente capacidad para satisfacer la demanda?



ACTIVE MODEL 3.1 ■ Análisis del plan agregado 1 utilizando los datos del fabricante de materiales para tejados en el Ejemplo 2

PROBLEMAS*



3.1. Desarrolle otro plan para el fabricante mexicano de materiales para tejados descrito en los Ejemplos 1 a 4 y en el Problema Resuelto 3.1. Para este plan, que llamaremos plan 5, la empresa quiere mantener una mano de obra constante de seis empleados, y utilizar subcontratación para hacer frente a la demanda. ¿Es preferible este plan?



3.2. El mismo fabricante de materiales para tejados de los Ejemplos 1 a 4 y del Problema Resuelto 3.1 tiene incluso un sexto plan. Se selecciona una plantilla fija de siete empleados, y la demanda restante se cubre mediante subcontratación. ¿Es mejor este plan?

3.3. La presidenta de Hill Enterprises, Terri Hill, prevé las necesidades de demanda agregada de la empresa durante los próximos ocho meses de la siguiente manera:

Enero	1.400	Mayo	2.200
Febrero	1.600	Junio	2.200
Marzo	1.800	Julio	1.800
Abril	1.800	Agosto	1.400

Su directora de operaciones está considerando un nuevo plan, que comenzaría en enero con 200 unidades y terminaría con un inventario cero. El coste por las ventas perdidas es de 100 dólares por unidad. El coste de almacenamiento de los stocks es de 20 dólares por unidad y por mes. Ignore cualquier coste por tiempo inactivo. Este plan lo denominará plan A.

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; [icono Excel] significa que se puede resolver el problema con Excel OM; **P** [icono Excel] significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

Plan A: Varíe el nivel de la mano de obra para ejecutar una estrategia de seguimiento (caza) produciendo la cantidad pedida en el mes anterior. La demanda y la cantidad producida en diciembre son, ambas, de 1.600 unidades por mes. El coste de contratación de operarios adicionales es de 5.000 dólares por cada 100 unidades. El coste de despedir a los empleados es de 7.500 dólares por cada 100 unidades. Evalúe este plan.

3.4. Utilizando la información del Problema 3.3, desarrolle el plan B. Produzca a un ritmo constante de 1.400 unidades al mes, que satisfará de forma mínima la demanda, y entonces utilice la subcontratación, con un coste adicional de 75 dólares por unidad. Evalúe este plan calculando los costes de enero a agosto.

3.5. Hill está considerando un plan C. El inventario inicial, los costes de rotura y los costes de almacenamiento se pueden ver en el Problema 3.3.

a) Plan C: Utilice una mano de obra fija para mantener una tasa constante de producción igual a las necesidades medias y permitir variar los niveles de inventario.
b) Dibuje la demanda en un gráfico que también muestre las necesidades medias. Realice su análisis desde enero hasta agosto.

3.6. El director de operaciones de Hill (*véanse* los Problemas 3.3 a 3.5) también está considerando dos estrategias mixtas para el periodo de enero a agosto:
Plan D: Mantenga la mano de obra actual constante para producir 1.600 unidades al mes. Permita un máximo del 20 por ciento de horas extras con un coste adicional de 50 dólares por unidad. Además, ahora la capacidad del almacén restringe el máximo inventario disponible a 400 unidades o menos.
Plan E: Mantenga la mano de obra constante, que está produciendo 1.600 unidades al mes, y subcontrate para hacer frente al resto de la demanda.
Evalúe los planes D y E.

3.7. Michael Carrigg, Inc., es un fabricante de reproductores de DVD que necesita un plan agregado desde julio hasta diciembre. La empresa ha reunido los siguientes datos:

Costes	
Costes de almacenamiento	8$/VCR/mes
Subcontratación	80$/VCR
Mano de obra en horario normal	12$/hora
Mano de obra en horas extras	18$/hora para horas por encima de 8 horas/empleado/día
Coste de contrataciones	40$/empleado
Coste de despidos	80$/empleado

Demanda	
Julio	400
Agosto	500
Septiembre	550
Octubre	700
Noviembre	800
Diciembre	700

Otros datos	
Mano de obra actual (junio)	8 personas
Horas de mano de obra/DVD	4 horas
Días laborables/mes	20 días
Inventario inicial	150 DVD*
Inventario final	0 DVD

**Observe que el inventario inicial tiene un coste de almacenamiento (de junio), que se arrastra a julio.*

¿Cuál sería el coste de cada una de las siguientes estrategias?

a) Varíe la mano de obra de manera que la producción iguale a la demanda. Carrigg tenía ocho empleados contratados en junio.
b) Varíe únicamente las horas extras y utilice una plantilla constante de ocho empleados.

3.8. Usted gestiona una empresa de consultoría en la misma calle en que está Michael Carrigg, Inc., y, para conseguir un contrato de la empresa, le dice al señor Carrigg (*véase* el problema anterior) que puede hacer una mejor planificación agregada que la que tiene actualmente. Le contesta: "Estupendo. Hágalo y le firmo un contrato de un año". Ahora tiene que hacer realidad su alarde utilizando los datos del problema anterior. Si desarrolla un plan con pedidos diferidos (*back orders*), algo que no le gusta al señor Carrigg, asegúrese de incluir un coste de 16 dólares por DVD y mes.

3.9. Mary Rhodes, directora de operaciones de Kansas Furniture, ha recibido las siguientes estimaciones de demanda:

Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
1.000	1.200	1.400	1.800	1.800	1.600

Suponiendo que los costes de rotura por ventas perdidas ascienden a 100 dólares, los costes de almacenamiento de inventarios son de 25 dólares por unidad y por mes, y que se quiere un inventario final igual a cero, evalúe estos dos planes basándose en coste *incremental*:

Plan A: Producir a una tasa fija (igual a unas necesidades mínimas) de 1.000 unidades al mes y subcontratar las unidades adicionales a un coste de 60 dólares por unidad.

Plan B: Variar la mano de obra, que produce actualmente a una tasa de 1.300 unidades por mes. El coste de contratación de empleados adicionales es de 3.000 dólares por cada 100 unidades producidas. El coste de los despidos es de 6.000 dólares por 100 unidades reducidas.

3.10. Mary Rhodes (*véase* el Problema 3.9) está considerando otras dos estrategias mixtas. Utilizando los datos del Problema 3.9, compare los planes C y D con los planes A y B y haga sus recomendaciones.

Plan C: Mantenga la plantilla actual a un nivel de producción de 1.300 unidades al mes. Subcontrate el resto para atender la demanda. Suponga que 300 unidades que quedan de junio están disponibles en julio.

Plan D: Mantenga el nivel de mano de obra actual capaz de producir 1.300 unidades al mes. Permita un máximo de un 20 por ciento de horas extras a un precio de 40 dólares por unidad. Suponga que las limitaciones del almacén no permiten almacenar más de 180 unidades de un mes a otro. Este plan significa que, cada vez que los inventarios lleguen a 180 unidades, la planta ha de detener la actividad. El tiempo inactivo cuesta 60 dólares por unidad. Cualquier necesidad adicional se subcontrata a un coste de 60 dólares por unidad adicional.

3.11. K. Cunningham Health and Beauty Products ha desarrollado un nuevo champú, y usted tiene que hacer su programación agregada. El departamento de contabilidad de costes le ha proporcionado los costes relacionados con el plan agregado y el departamento de marketing le ha proporcionado las previsiones para cuatro trimestres. Todo ello se muestra a continuación:

Trimestre	Previsión
1	1.400
2	1.200
3	1.500
4	1.300

Costes	
Producción del trimestre anterior	1.500 unidades
Inventario inicial	0 unidades
Coste de rotura por retención de pedidos	50$ por unidad
Costes de almacenamiento	10$ por unidad para cada unidad existente al final del trimestre
Contratación de trabajadores	40$ por unidad
Despido de trabajadores	80$ por unidad
Coste por unidad	30$ por unidad
Horas extras	15$ extras por unidad
Subcontratación	No disponible

Su trabajo consiste en desarrollar un plan agregado para los próximos cuatro trimestres.

a) Primero, elabore un plan de seguimiento (caza) contratando y despidiendo según sea necesario para moderar los costes.
b) Después elabore un plan que mantenga una plantilla constante.
c) ¿Cuál es el plan más económico para K. Cunningham Health and Beauty Products?

3.12. Soda Pop, Inc., de Tampa tiene un nuevo refresco de frutas en el que ha puesto grandes esperanzas. Don Hammond, el planificador de la producción, ha recopilado los siguientes datos de costes y de previsión de la demanda:

Trimestre	Previsión
1	1.800
2	1.100
3	1.600
4	900

Costes	
Producción del trimestre anterior	1.300 cajas
Inventario inicial	0 cajas
Coste de rotura	150$ por caja
Coste de almacenamiento	40$ por caja existente al final del trimestre
Contratación de trabajadores	40$ por caja
Despido de trabajadores	80$ por caja
Coste de la subcontratación	60$ por caja
Coste por unidad en horas normales	30$ por caja
Coste en horas extras	15$ extras por caja
Capacidad en horario normal	1.800 cajas por trimestre

El trabajo de Don consiste en desarrollar un plan agregado. Las tres opciones iniciales que quiere evaluar son:

a) Plan A: estrategia de seguimiento que contrata y despide a trabajadores cuando sea necesario para satisfacer la previsión.
b) Plan B: una estrategia nivelada (estable).
c) Plan C: una estrategia nivelada que produce 1.200 cajas por trimestre y satisface la demanda prevista con inventario y subcontratación.
d) ¿Qué estrategia es la que genera el plan de menor coste?
e) Si fuera el jefe de Don, el vicepresidente de operaciones, ¿qué plan aplicaría y por qué?

3.13. La empresa de Josie Gall ha desarrollado los siguientes datos de producción, demanda, coste e inventario. Asigne la capacidad de producción para satisfacer la demanda a un

coste mínimo utilizando el método de transporte. ¿Cuál es el coste? Suponga que el inventario inicial no tiene coste de almacenamiento en el primer periodo.

Capacidad de producción disponible

Periodo	Horas normales	Horas extras	Subcontratación	Previsión de demanda
1	30	10	5	40
2	35	12	5	50
3	30	10	5	40

Inventario inicial	20 unidades
Coste por unidad en horas normales	100 dólares
Coste por unidad en horas extras	150 dólares
Coste por unidad subcontratada	200 dólares
Costes de almacenamiento por unidad y mes	4 dólares

3.14. Haifa Instruments, fabricante israelí de unidades portátiles para diálisis de riñón y de otros productos médicos, desarrolla un plan agregado a 4 meses. Se estiman la demanda y la capacidad (en unidades) tal y como indica el siguiente cuadro:

Capacidad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Mano de obra				
Horas normales	235	235	290	300
Horas extras	20	24	26	24
Subcontratación	12	15	15	17
Demanda	255	294	321	301

El coste de producir cada unidad de diálisis es de 985 dólares en horas normales, 1.310 dólares en horas extras y 1.500 dólares subcontratando. El coste de almacenamiento es de 100 dólares por unidad y mes. No hay inventario inicial ni habrá final. Establezca, utilizando el método de transporte, un plan de producción que minimice el coste.

3.15. En Fernandez Electronics, Inc., de Georgia, el periodo de planificación de la producción para monitores de pantalla plana es de 4 meses. Los datos de costes son los siguientes:

Coste por monitor en horario normal	70$
Coste por monitor en horas extras	110$
Coste por monitor en subcontratación	120$
Coste de almacenamiento por monitor y mes	4$

Para cada uno de los próximos 4 meses, la capacidad y la demanda de los monitores de pantalla plana son las siguientes:

	Periodo			
	Mes 1	Mes 2	Mes 3*	Mes 4
Demanda	2.000	2.500	1.500	2.100
Capacidad				
Horario normal	1.500	1.600	750	1.600
Horas extras	400	400	200	400
Subcontratación	600	600	600	600

*La fábrica cierra dos semanas por vacaciones.

Fernandez Electronics espera iniciar el periodo de planificación con 500 monitores en inventario. No se permite diferir pedidos (lo que significa, por ejemplo, que los monitores fabricados durante el segundo mes no se pueden utilizar para cubrir la demanda del primer mes). Desarrolle un plan de producción que minimice los costes utilizando el método de transporte.

: P **3.16**. Una fábrica de piensos de Omaha, Cohen & Render Processing, prepara su plan agregado para los próximos seis meses previendo la demanda de sacos de 25 kg. de pienso para ganado de la siguiente manera: enero, 1.000 sacos; febrero, 1.200; marzo, 1.250; abril, 1.450; mayo, 1.400, y junio, 1.400. La fábrica de pienso prevé iniciar el nuevo año sin inventario proveniente del año anterior. La fábrica proyecta una capacidad constante para producir 800 sacos de pienso al mes (durante las horas normales) hasta el final de abril, para después aumentar a 1.100 sacos por mes cuando se complete la ampliación prevista el 1 de mayo. La capacidad en horas extras se establece en 300 sacos al mes hasta la ampliación, en cuyo momento aumentará a 400 sacos por mes. Un competidor colaborador de Sioux City, Iowa, podría estar disponible como apoyo para satisfacer la demanda, pero únicamente podría proveer 500 sacos durante el periodo de 6 meses. Desarrolle un plan de producción a 6 meses para la fábrica de piensos utilizando el método de transporte.

Los datos de costes son los siguientes:

Coste de cada saco en horario normal (hasta el 30 de abril)	12,00 dólares
Coste de cada saco en horario normal (desde 1 de mayo)	11,00 dólares
Coste de cada saco en horas extras (en todo el periodo)	16,00 dólares
Coste de compra de cada saco en el exterior	18,50 dólares
Coste de almacenamiento por saco y mes	1,00 dólares

: P **3.17.** Lon Min ha desarrollado una bolsa especial al vacío con cierre hermético para aumentar la frescura del marisco que se envía a los restaurantes. Ha recopilado los siguientes datos sobre costes y demanda:

Trimestre	Previsión (unidades)	Horario normal	Horas extras	Subcontratación
1	500	400	80	100
2	750	400	80	100
3	900	800	160	100
4	450	400	80	100

Inventario inicial	250 unidades
Coste por unidad en horas normales	1,0$
Coste por unidad en horas extras	1,5$/unidad
Coste por unidad subcontratada	2$/unidad
Coste de almacenamiento	0,2$/unidad/trimestre
Coste de diferir pedidos	0,5$/unidad/trimestre

Min decide que el inventario inicial de 250 unidades acarreará el coste de 0,2$/unidad desde el periodo anterior (a diferencia de la situación en la mayoría de las empresas donde se asigna un coste nulo por unidad a este inventario inicial).

a) Determine el plan óptimo utilizando el método de transporte.
b) ¿Cuál es el coste del plan?
c) ¿Existe capacidad en horario normal no utilizada? En caso afirmativo, ¿cuánto y en qué periodos?
d) ¿Hasta qué punto se recurre a diferir pedidos, en unidades y dólares?

3.18. José Martínez de El Paso ha desarrollado unos componentes de acero inoxidable pulidos para su máquina de fabricación de tacos que hace que ésta sea una "pieza estrella" en los restaurantes mexicanos. Tiene que desarrollar un plan agregado a 5 meses. Su previsión de capacidad y demanda es la siguiente:

	Periodo				
	1	2	3	4	5
Demanda	150	160	130	200	210
Capacidad					
Horas normales	150	150	150	150	150
Horas extras	20	20	10	10	10

Subcontratación	100 unidades disponibles durante el periodo de 5 meses.
Inventario inicial	0 unidades.
Inventario final necesario	20 unidades.

Costes	
Coste por unidad en horas normales	100 dólares
Coste por unidad en horas extras	125 dólares
Coste por unidad subcontratada	135 dólares
Coste de inventario por unidad y periodo	3 dólares

Suponga que no es posible diferir pedidos. Utilizando el método de transporte, ¿cuál es el coste total del plan óptimo?

3.19. Chris Fisher, propietario de una fábrica de expositores en Ohio, desarrolla un plan agregado de 8 meses, siendo la previsión de demanda y la capacidad de producción (en unidades) la siguiente:

Capacidad (unidades)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Horas normales	235	255	290	300	300	290	300	290
Horas extras	20	24	26	24	30	28	30	30
Subcontratación	12	16	15	17	17	19	19	20
Demanda	255	294	321	301	330	320	345	340

El coste de producción de cada unidad es de 1.000 dólares en horas normales, 1.300 dólares en horas extras y 1.800 dólares subcontratando. El coste de almacenamiento es de 200 dólares por unidad y mes. No hay ni inventario final ni inicial y no se permite diferir pedidos de un periodo a otro.

a) Prepare un plan de producción que minimice los costes produciendo exactamente la demanda de cada mes. Permita que varíe la mano de obra utilizando en primer lugar las horas normales, a continuación las horas extras, y finalmente subcontratando. ¿Cuál es el coste del plan?

b) Con una mejor planificación, la producción en horas normales puede fijarse en exactamente la misma cantidad: 275 unidades al mes. ¿Alteraría esto la solución?

c) Si los costes por horas extras aumentan de 1.300 dólares a 1.400 dólares, ¿cambiaría su respuesta al apartado a)? ¿Qué ocurriría si bajaran a 1.200 dólares?

3.20. Abernathy y Cohen es una pequeña empresa de servicios de contabilidad, dirigida por Joseph Cohen desde la jubilación en 2002 de su socio Lionel Abernathy. Cohen y sus 3 contables pueden facturar juntos 640 horas al mes. Cuando Cohen u otro contable factura más de 160 horas al mes, recibe una paga adicional por "horas extras" de 62,5 dólares por cada hora extra. Este salario adicional se suma a los 5.000 dólares que cobra cada uno al mes. (Cohen cobra lo mismo que sus empleados). Cohen trata de convencer insistentemente a cualquiera de sus contables de que trabaje (facture) no más de 240 horas al mes. La demanda en horas facturables para la empresa durante los próximos seis meses está estimada a continuación:

Mes	Estimación de horas facturables
Enero	600
Febrero	500
Marzo	1.000
Abril	1.200
Mayo	650
Junio	590

Cohen tiene un acuerdo con su anterior socio por el que éste vendrá a ayudar en la ajetreada época de presentación de declaraciones de impuestos, por un salario de 125 dólares por hora. Cohen no se plantea despedir a ninguno de sus empleados en el caso de que hubiera poca demanda. Sin embargo, podría contratar a otro contable por el mismo salario si la demanda lo requiriera.

a) Desarrolle un plan agregado para los próximos 6 meses.
b) Calcule los costes del plan de Cohen utilizando horas extras y la ayuda de Abernathy.
c) ¿Debe seguir la empresa como está, con sólo 4 contables?

3.21. Volviendo al problema anterior. Al hacer la planificación del próximo año, Cohen estima que las horas facturables aumentarán en un 10 por ciento para cada uno de los 6 meses. Por tanto, procede a contratar a un quinto contable; con los mismos costes para el horario normal, horas extras y el contable externo (Abernathy).

a) Desarrolle un nuevo plan agregado y calcule sus costes.
b) Haga su comentario sobre la plantilla con 5 contables. ¿Fue una buena decisión contratar al quinto contable?

3.22. El vuelo diario de Southeastern Airlines de Atlanta a Charlotte utiliza un Boeing 737, con asientos para 120 personas. Hasta ahora, la compañía aérea ha cobrado una tarifa única de 140 dólares por un billete de ida. Hay una media de 80 pasajeros por vuelo. El coste variable de un asiento ocupado asciende a 25 dólares. Katie Morgan, la nueva directora de operaciones, ha decidido probar un enfoque de *yield management*, con asientos por 80 dólares por compra anticipada y 190 dólares por compra en la semana del vuelo. Estima que la compañía venderá 65 pasajes al precio reducido y 35 al precio superior. El coste variable no cambia. ¿Qué enfoque es el mejor?



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: 3.23 a 3.26.

■ Caso de estudio ■

Southwestern University: G*

Dadas las crecientes demandas de seguridad derivadas del éxito del programa de fútbol, el jefe de policía del campus universitario de la Universidad Southwestern, John Swearingen, quiere desarrollar un plan de dos años que implica la solicitud de recursos adicionales.

El departamento de la Universidad dispone actualmente de 26 oficiales de policía. El tamaño de la plantilla no ha cambiado en los últimos 15 años, pero los cambios siguientes han movido al jefe de policía a buscar más recursos:

- Se ha incrementado el programa de deportes y, especialmente, el de fútbol.
- La Universidad se ha expandido geográficamente, con algunas nuevas instalaciones de investigación y laboratorios, que se encuentran a algunos kilómetros del campus universitario principal.
- Han aumentado los problemas de tráfico y aparcamiento.
- En todo el campus universitario, existen muchas más computadoras portátiles que antes, y además caros, con alto riesgo de ser robados.
- Han aumentado los problemas derivados del alcohol y las drogas.
- El tamaño de la comunidad vecina a la universidad se ha duplicado.
- La policía necesita dedicar más tiempo a programas de educación y prevención.

La universidad se encuentra en Stephenville, Texas, una pequeña ciudad a 45 kilómetros al sudoeste del área metropolitana de Dallas/Forth Worth. Durante los meses de verano, la población de estudiantes es de unos 5.000. Este número aumenta hasta los 20.000 durante los semestres de otoño y primavera. Por consiguiente, la demanda de policía y otros servicios es mucho menor durante los meses de verano. La demanda de los servicios de policía también varía según lo siguiente:

- Hora del día (los picos se producen entre las 10 de la noche y las dos de la madrugada).
- Día de la semana (en los fines de semana hay más actividad).
- Algunos fines de semana a lo largo del curso (en los fines de semana en los que hay fútbol, vienen al campus universitario cerca de 50.000 personas de más).
- Acontecimientos especiales (recepción de estudiantes, salida de estudiantes, entrega de la licenciatura).

Los fines de semana que hay fútbol son especialmente difíciles para el personal. Se necesitan servicios adicionales de policía habitualmente de las 8 de la mañana a las 5 de la tarde en los 5 sábados de fútbol. Toda la plantilla de 26 personas es convocada para trabajar doble turno. Se paga a más de 40 agentes de apoyo de las localidades cercanas para que acudan en su tiempo libre, y una docena de policías estatales vienen sin coste alguno (cuando están disponibles). Se paga a 25 estudiantes y residentes para ayudar en la gestión del tráfico y del aparcamiento. Durante el último año académico (un periodo de 9 meses), los pagos de horas extras a los agentes de policía del campus universitario fueron de cerca de 120.000 dólares.

Otros datos relevantes son los siguientes:

- El salario medio inicial de un agente de policía es de 28.000 dólares.
- Se paga 9 dólares/hora a los estudiantes y residentes locales que ayudan en el tráfico y en el aparcamiento.
- Las horas extras que se pagan a un policía que trabaja más de 40 horas a la semana son a 18 dólares/hora. Los agentes que se contratan a tiempo parcial de otras agencias exteriores (localidades cercanas) también ganan 18 dólares/hora.
- Parece haber un número ilimitado de agentes que trabajarían para la universidad en los acontecimientos especiales.
- Con días libres, vacaciones, y considerando la media de días de baja por enfermedad, se necesitarían cin-

* Este caso de estudio integrado se desarrolla a lo largo de todo el texto. Otras temas relativos a la expansión futbolística de Southwestern son: (A) gestión del proyecto del estadio (Capítulo 3 del primer volumen); (B) previsión de la asistencia a los partidos (Capítulo 4 del primer volumen); (C) calidad de las instalaciones (Capítulo 6 del primer volumen); (D) análisis del umbral de rentabilidad para los servicios de restauración (sitio web del suplemento del Capítulo 7 del primer volumen); (E) dónde se va a ubicar el nuevo estadio (sitio web del Capítulo 8 del primer volumen); (F) planificación de inventario de los programas de fútbol (sitio web del Capítulo 2 de este volumen).

co personas para cubrir un puesto de trabajo de 24 horas al día y 7 días a la semana.

La planificación de agentes durante la estación de otoño y primavera es:

	Días laborables	Fin de semana
Primer turno (7 a.m.-3 p.m.)	5	4
Segundo turno (3 p.m.-11 p.m.)	5	6
Tercer turno (11 p.m.-7 a.m.)	6	8

El personal necesario en los fines de semana de fútbol y acontecimientos especiales es *adicional* a la planificación anterior. El personal de verano es, de media, la mitad de lo mostrado.

Swearingen piensa que su plantilla actual está empleada al máximo y no puede dar más de sí. Agentes fatigados constituyen un problema potencial para el departamento y la comunidad. Además, no hay tiempo ni personal dedicado a la prevención del crimen, y a programas de seguridad y salud. La relación entre los agentes de policía y los estudiantes, profesores y personal de la universidad es mínima y habitualmente negativa. A la luz de estos problemas, el jefe de policía desearía solicitar financiación para cuatro agentes más, dos asignados a nuevos programas y dos para aliviar la sobrecarga de la plantilla actual. Desearía también comenzar a limitar las horas extras a 10 horas por semana para cada agente.

Preguntas para el debate

1. ¿Qué variaciones en la demanda de servicios de policía deben tomarse en cuenta en un plan agregado para recursos? ¿Qué variaciones pueden llevarse a cabo con ajustes de programación a corto plazo?
2. Evalúe el actual plan de dotación de personal. ¿Cuánto cuesta? ¿Es suficiente una plantilla de 26 agentes para manejar la carga de trabajo normal?
3. ¿Cuál sería el coste adicional de la propuesta del jefe de policía? ¿Qué le sugeriríamos para que justificase su petición?
4. ¿Cuánto cuesta actualmente a la universidad el suministrar los servicios de policía en los partidos de fútbol? ¿Cuáles serían los pros y los contras de subcontratar totalmente este trabajo con agencias de seguridad externas?
5. Proponga otras alternativas.

Fuente: Adaptado de C. Haksever, B. Render y R. Russell, *Service Management and Operations*, 2.ª edición (Upper Saddle River, NJ; Prentice Hall, 2000) 308-309. Reeditado con permiso de Prentice Hall, Inc.

■ *Caso de estudio* ■

Andrew-Carter, Inc.

Andrew-Carter, Inc. (A-C), es un importante productor y distribuidor canadiense de componentes de alumbrado exterior. Sus productos se distribuyen por todo el continente americano, Sur y Norte, y ha tenido una alta demanda durante varios años. La empresa posee tres plantas que producen los componentes y los distribuyen a cinco centros de distribución (almacenes).

Durante la actual ralentización económica mundial, A-C ha observado una importante disminución de la demanda de sus productos, en gran medida por el declive del mercado de viviendas. Basándose en las previsiones de los tipos de interés, el jefe de operaciones piensa que la demanda de vivienda, y por tanto la de sus productos, permanecerá baja en un futuro inmediato. A-C está pensando cerrar una de sus plantas, ya que ahora está funcionando con un exceso de capacidad de 34.000 unidades a la semana. La previsión de la demanda semanal para el próximo año es la siguiente:

Almacén 1	9.000 unidades
Almacén 2	13.000
Almacén 3	11.000
Almacén 4	15.000
Almacén 5	8.000

Las capacidades de las plantas, en unidades por semana, son:

Fábrica 1, horas normales	27.000 unidades
Fábrica 1, horas extras	7.000

Fábrica 2, horas normales	20.000
Fábrica 2, horas extras	5.000
Fábrica 3, horas normales	25.000
Fábrica 3, horas extras	8.000

Si A-C cerrase alguna de sus plantas, sus costes semanales cambiarían, debido a que los costes fijos serían más bajos en una planta no operativa. La Tabla 1 muestra los costes de producción en cada fábrica, los costes variables en horas normales y horas extras y los costes fijos cuando la fábrica está operativa o no operativa. La Tabla 2 muestra los costes de distribución desde cada planta a cada centro de distribución.

TABLA 1 ■ Costes variables y costes fijos de producción por semana en Andrew-Carter, Inc.

Planta	Coste variable (por unidad)	Costes fijos por semana	
		Operativa	No operativa
1, horas normales	2,80$	14.000$	6.000$
1, horas extras	3,52		
2, horas normales	2,78	12.000	5.000
2, horas extras	3,48		
3, horas normales	2,72	15.000	7.500
3, horas extras	3,42		

TABLA 2 ■ Costes de distribución por unidad de Andrew-Carter, Inc.

Desde planta	A centro de distribución				
	Alm. 1	Alm. 2	Alm. 3	Alm. 4	Alm. 5
1	0,50$	0,44$	0,49$	0,46$	0,56$
2	0,40	0,52	0,50	0,56	0,57
3	0,56	0,53	0,51	0,54	0,35

Preguntas para el debate

1. Evalúe las diferentes configuraciones posibles de plantas operativas o cerradas que satisfarán la demanda semanal. Determine qué configuración minimiza los costes totales.
2. Analice las repercusiones de cerrar una planta.

Fuente: Reeditado con el permiso del profesor Michael Ballot, University of the Pacific, Stockton, CA.

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Visite nuestra página personal <u>www.prenhall.com/heizer</u> para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Cornwell Glass:** Trata de establecer un plan de producción para un fabricante de lunas para automóviles.

Harvard ha seleccionado estos casos de la Harvard Business School para acompañar este capítulo (<u>textbookcasematch.hbsp.harvard.edu</u>):

- **MacPherson Refrigeration Ltd.** (#93-D021): Los alumnos tienen que analizar tres planes de producción agregada para los productos de la empresa.
- **Sport Obermeyer Ltd.** (#695-022): Esta empresa asiática de ropa de esquí tiene que ajustar oferta con demanda para productos con una demanda incierta y una cadena de suministros repartida por todo el mundo.
- **Charicraft Corp.** (#689-082): Muestra una planificación de producción eficaz en un proceso de múltiples etapas con demanda estacional.



BIBLIOGRAFÍA

Fisher, M. L., J. H. Hammond, W. R. Obermeyer, y A. Raman. "Making Supply Meet Demand in an Uncertain World". *Harvard Business Review* 72, n.º 3 (1994): pp. 83-93.

Gunasekaran, A., y H. B. Marri. "Application of Aggregate Planning Models in Developing Countries". *International Journal of Computed Applications in Technology* 20, n.º 4 (2004): p. 172.

Haksever, C., B. Render, y R. Russell. *Service Management and Operations,* 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2000).

Hopp, Wallace J., y Mark L. Spearman. *Factory Physics,* 2.ª ed. New York: Irwin/McGraw-Hill (2001).

Hurtubise, S., y C. Olivier. "Planning Tools for Managing the Supply Chain". *Computers & Industrial Engineering* 46, n.º 4 (junio 2004): p. 763.

Kimes, S. E., y G. M. Thompson. "Restaurant Revenue Management at Chevy's". *Decision Sciences* 35, n.º 3 (verano 2004): pp. 371-393.

Metters, R., K. King-Metters, y M. Pullman. *Successful Service Operations Management.* Mason, Ohio: Thompson-Southwestern (2003).

Ryan, D. M. "Optimization Earns its Wings". *OR/MS Today* 27, n.º 2 (2000): pp. 26-30.

Sasser, W. E. "Match Supply and Demand in Service Industries". *Harvard Business Review* 54 n.º 6 (noviembre-diciembre 1976): pp. 133-140.

Silver, E. A., D. F. Pyke, y R. Peterson. *Inventory Management and Production Planning and Scheduling.* New York: Wiley (1998).

Sipper, Daniel, y Robert Bulfin. *Production: Planning, Control, and Integration.* New York: McGraw-Hill (1997).

Vollmann, T. E., W. L. Berry, y D. C. Whybark. *Manufacturing Planning and Control Systems,* 4.ª ed. Burr Ridge, IL: Irwin (1997).



RECURSOS EN INTERNET

APICS courses:
http://www.apics.org

Methods of Aggregate Planning:
http://soba.fortlewis.edu/rap/353-2001/Aggregateplanningmethodaggregateplan.htm

PLANIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DE MATERIALES (MRP) Y ERP

4

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando haya completado este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Listas de planificación y kits (conjuntos)
- Listas fantasmas
- Codificación de nivel inferior
- Lotificación

Describir o explicar:

- Planificación de las necesidades de materiales
- Planificación de las necesidades de distribución
- Planificación de los recursos de la empresa
- Cómo funciona un ERP
- Ventajas y desventajas de los sistemas ERP

PERFIL DE UNA EMPRESA GLOBAL: COLLINS INDUSTRIES

El MRP proporciona una ventaja competitiva a Collins Industries

Collins utiliza células de trabajo para abastecer a la línea de montaje. Dispone de un taller completo de carpintería (para proveer el mobiliario interior), un taller de pintura (que prepara la pintura, pinta y acaba los detalles de cada vehículo), un taller eléctrico (que proporciona los complejos sistemas electrónicos de una ambulancia moderna), un taller de tapicería (para la fabricación de los asientos y los bancos interiores) y, tal como se muestra aquí, un taller de construcciones metálicas (para construir la carrocería de la ambulancia).

En seis líneas de montaje paralelas, las ambulancias avanzan cada día hasta la siguiente estación de trabajo. El sistema de MRP asegura que los materiales necesarios en cada estación se entreguen durante la noche para su montaje al día siguiente.

De media hay unos 24 kilómetros de cables en cada vehículo de Collins. Esto se puede comparar con los 27 kilómetros de cables en un sofisticado avión de combate F-16.

Para algunas localidades rurales puede ser el equivalente a la sala de urgencias de un hospital en miniatura, lo que da idea de la complejidad del producto. Para complicar aún más la producción, prácticamente todas las ambulancias están personalizadas. Esta personalización en función de los requisitos del cliente hace necesario que se realicen pedidos precisos, y se disponga de excelentes listas de materiales, un control excepcional del inventario, desde el suministrador al montaje, y un sistema MRP que funcione.

Collins Industries, con sede en Hutchinson, Kansas, es el mayor fabricante de ambulancias del mundo. La empresa, que factura 150 millones de dólares, es un competidor internacional que vende más del 25 por ciento de sus vehículos a mercados fuera de Estados Unidos. En su mayor filial de ambulancias (llamada Wheeled Coach), situada en Winter Park, Florida, los vehículos son producidos en cadenas de montaje (es decir, mediante un proceso repetitivo). En la fábrica de Florida se montan los 12 diseños principales de ambulancia, que utilizan 18.000 diferentes artículos de inventario, incluyendo 6.000 componentes manufacturados y 12.000 comprados.

Esta diversidad de productos y la naturaleza del proceso exigen una buena planificación de las necesidades de materiales (*Material Requirements Planning:* MRP). Una utilización eficaz de un sistema MRP requiere listas de materiales exactas y registros de inventarios también exactos. El sistema de Collins, que utiliza un software MAPICS DB con una computadora IBM AS400, proporciona actualizaciones diarias, y ha reducido el inventario más de un 30 por ciento en sólo dos años.

Collins insiste en que hay que realizar correctamente cuatro tareas clave. En primer lugar, el plan de materiales debe satisfacer tanto los requisitos del programa maestro de producción como los de capacidad de la instalación de producción. En segundo lugar, el plan se debe llevar a cabo tal y como se diseñó. En tercer lugar, la inversión en inventario debe reducirse mediante la entrega de materiales en la cantidad exacta y en el momento necesario, disponiendo de inventarios en consigna y con una constante revisión de los métodos de compra. Finalmente, debe mantenerse una excelente integridad de los registros. La exactitud de los registros es reconocida como un factor fundamental para el éxito de su programa MRP. Los recuentos cíclicos de Collins implican auditorías de materiales que no sólo corrigen los errores, sino que también investigan y corrigen los problemas.

Collins Industries utiliza MRP como catalizador para mantener un inventario reducido, una gran calidad, programas rigurosos y unos registros exactos. Collins ha logrado una ventaja competitiva mediante el MRP.

Collins Industries, y muchas otras empresas, han encontrado importantes beneficios en el MRP. Estos beneficios incluyen (1) una mejor respuesta a los pedidos de los clientes como resultado de un mejor cumplimiento de los programas, (2) una respuesta más rápida a los cambios del mercado, (3) una mejor utilización de las instalaciones y de la mano de obra, y (4) una reducción de los niveles de inventario. Una mejor respuesta a los pedidos de los clientes y al mercado permite ganar pedidos y cuota de mercado. Una mejor utilización de las instalaciones y del personal proporciona una mayor productividad y un mejor retorno de la inversión. La reducción de los inventarios libera capital y espacio para otros usos. Estos beneficios son el resultado de la decisión estratégica de utilizar un sistema de planificación de inventario *dependiente*. La demanda de cada uno de los componentes de una ambulancia es dependiente.

DIEZ DECISIONES ESTRATÉGICAS DE DIRECCIÓN DE OPERACIONES

- Diseño de bienes y servicios
- Gestión de la calidad
- Estrategia de proceso
- Estrategias de localización
- Estrategias de layout
- Recursos humanos
- Dirección de la cadena de suministros
- **Gestión del inventario**
  - Demanda independiente
  - **Demanda dependiente**
  - Sistemas JIT y Ajustados
- Programación
- Mantenimiento

Por *demanda dependiente* nos referiremos a la demanda de un artículo que está relacionada con la demanda de otro artículo. Analice el caso del Ford Explorer. La demanda de neumáticos y radiadores de Ford depende de la producción de Explorers. Cuatro neumáticos y un radiador forman parte de cada Explorer terminado. La demanda de los artículos es *dependiente* cuando se puede determinar la relación entre los artículos. Así, una vez que la dirección recibe un pedido o hace una previsión de la demanda del producto final, se pueden calcular las cantidades necesarias de todos los componentes, debido a que todos los componentes son artículos dependientes. El director de operaciones de Boeing Aircraft, que programa la producción de un avión por semana, por ejemplo, conoce todas las necesidades hasta el último remache. En cualquier producto, todos los componentes de ese producto son artículos de demanda dependiente. *En general, para cualquier artículo para el que se puede establecer un programa, deben utilizarse las técnicas dependientes.*

Cuando se cumplen los requisitos de los modelos de demanda dependiente, éstos son preferibles a los modelos EOQ descritos en el Capítulo 2 de este volumen[1]. La dependencia existe para todas las partes componentes, submontajes y suministros una vez que se conoce el programa maestro. Los modelos dependientes son mejores no sólo para los fabricantes y distribuidores, sino también para una amplia variedad de empresas, desde restaurantes hasta hospitales. La técnica dependiente utilizada en entornos de producción se denomina **planificación de las necesidades de materiales (MRP)**.

Planificación de las necesidades de materiales (MRP)
Una técnica de demanda dependiente que utiliza listas de materiales, inventarios, recepciones programadas y un programa maestro de producción para determinar las necesidades de materiales.

Dado que el MRP proporciona una estructura tan bien definida para la demanda dependiente, ha evolucionado convirtiéndose en la base de la Planificación de los Recursos de la Empresa (ERP). ERP es un sistema de información que identifica y planifica los recursos necesarios en toda la empresa para tomar, realizar, enviar y contabilizar los pedidos de los clientes. Presentaremos el ERP en la última parte de este capítulo.

REQUISITOS DEL MODELO DE INVENTARIO CON DEMANDA DEPENDIENTE

La utilización eficaz de los modelos de inventario dependiente exige que el director de operaciones conozca:

1. El plan (programa) maestro de producción (qué se va a hacer y cuándo).

---

[1] Los modelos de inventario EOQ desarrollados en el Capítulo 2 de este volumen suponían que la demanda de un artículo era independiente de la demanda de otro artículo. Por ejemplo, con el modelo EOQ se supone que la demanda de los componentes de los frigoríficos es *independiente* de la demanda de frigoríficos y que esa demanda es constante.

2. Las especificaciones o listas de materiales (los materiales y partes necesarias para hacer el producto).
3. La disponibilidad de inventario (qué hay en stock).
4. Las órdenes de compra pendientes (qué está ya pedido).
5. Los plazos (cuánto tiempo se necesita para tener los distintos componentes).

A continuación pasamos a analizar estos requisitos en el contexto de la planificación de las necesidades de materiales (MRP).

Plan (Programa) maestro de producción

Programa maestro de producción (MPS)
Programa que especifica qué se debe producir y cuándo.

Un **programa maestro de producción** (*master production schedule,* MPS) especifica lo que se va a hacer (es decir, el número de productos o artículos acabados) y cuándo. El programa debe ser coherente con un plan agregado de producción. El plan de producción establece la cantidad global que se va a producir en términos generales (por ejemplo, familias de producto, horas estándar o volumen en dólares). Estos planes también incluyen una variedad de inputs, como son los planes financieros, la demanda de los clientes, las capacidades de ingeniería, la disponibilidad de mano de obra, las fluctuaciones del inventario, el rendimiento de los proveedores y otras consideraciones. Cada uno de estos inputs contribuye a su manera al plan de producción, como se muestra en la Figura 4.1.

A medida que avanza el proceso de planificación desde el plan de producción hasta su ejecución, cada uno de los planes de nivel inferior debe ser factible. Cuando no es así, se informa (*feedback*) al nivel superior anterior para efectuar el ajuste necesario. Uno de los principales puntos fuertes del MRP es su capacidad para determinar de forma precisa la viabilidad de un plan teniendo en cuenta las restricciones de capacidad. Este proceso de planificación puede dar excelentes resultados. El plan de producción (agregado) establece los límites superior e inferior para el programa maestro de producción. El resultado de este proceso de planificación de la producción es el programa maestro de producción.

El programa maestro de producción se deduce del plan agregado.

El programa maestro de producción nos dice lo que se necesita para satisfacer la demanda y cumplir con el plan de producción. Este programa establece qué artículos hay que producir y cuándo: *Desagrega* el plan de producción *agregado*. Mientras que *el plan de producción agregado* (tal y como vimos en el Capítulo 3) se define en términos muy amplios (agregados), tales como familias de productos o toneladas de acero, el *plan maestro de producción* se establece en términos de productos específicos. La Figura 4.2 muestra los programas maestros de tres modelos de equipos estéreo que provienen de un plan agregado de producción de una familia de amplificadores estéreo.



MRP en Wheeled Coach Ambulances

Los directores deben ajustarse al programa durante un periodo razonable (normalmente una proporción importante del ciclo de producción: el tiempo que lleva producir un artículo). Muchas organizaciones definen un programa maestro de producción y una política coherente en no cambiar ("fijar") la porción del plan más cercana en el tiempo. Esta porción a corto plazo del plan se conoce entonces como programa "fijo", "en firme" o "congelado". La división de Collins Industries, Wheleed Coach, objeto del apartado *Perfil de una empresa global* de este capítulo, fija los 14 últimos días de su programa. Sólo se permiten cambios más allá del programa fijo. El programa se convierte en un programa de producción "movil". Por ejemplo, a un programa fijo de siete semanas se le añade una semana adicional cada vez que se acaba una semana, manteniendo así un programa fijo de siete semanas. Hay que darse cuenta de que el programa maestro de producción es una decisión de lo que *hay que producir*, no un pronóstico de la demanda. El programa maestro puede expresarse en cualquiera de los siguientes términos:

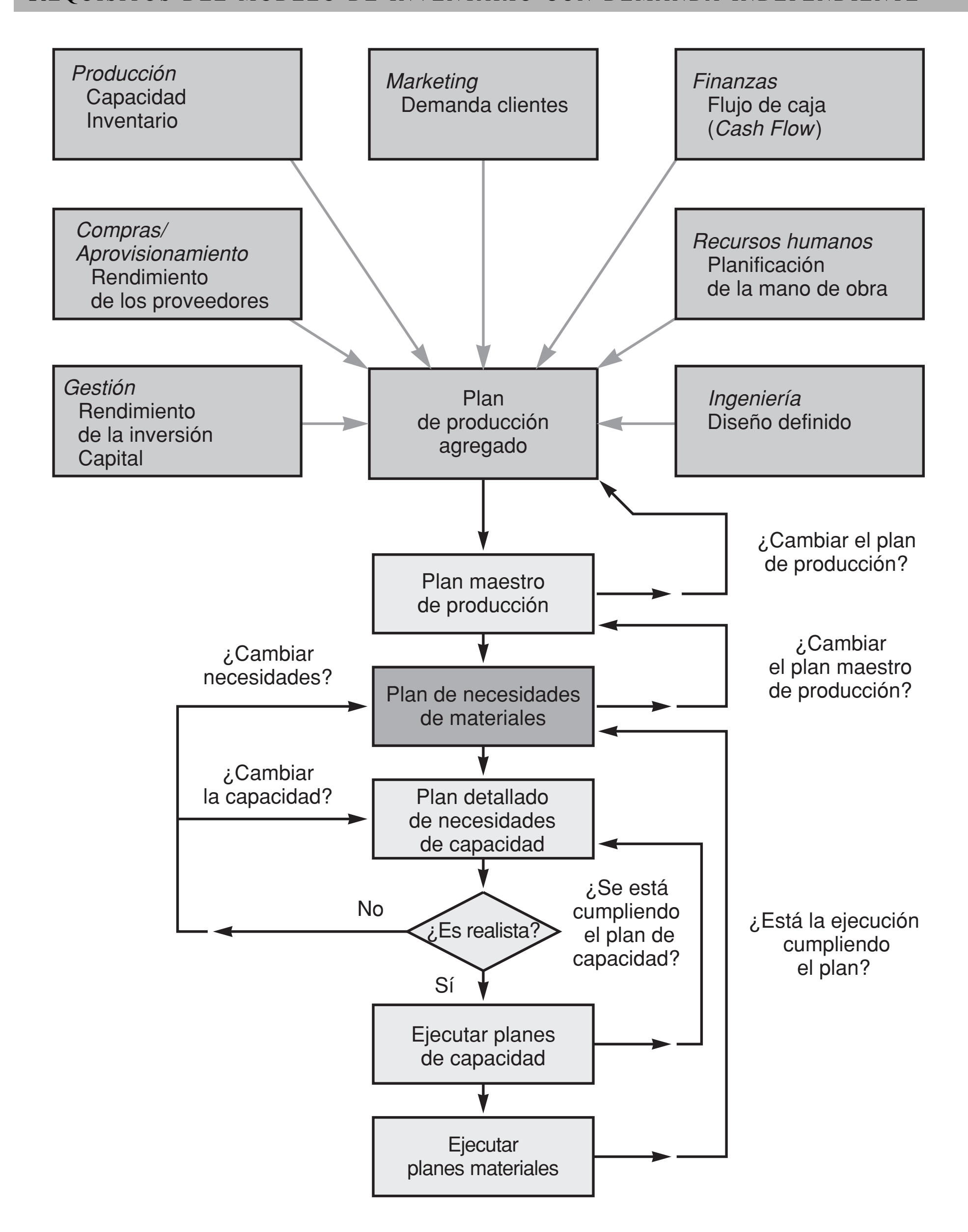


FIGURA 4.1 ■ El proceso de planificación

Independientemente de la complejidad del proceso de planificación, se debe desarrollar el plan de producción y su derivado, el programa maestro de producción.

1. *Un pedido de un cliente en un entorno de taller* (fabricación contra pedido).
2. *Módulos en un entorno repetitivo* (montaje contra pedido o previsión).
3. *Un producto acabado en un entorno de producción continua* (fabricación contra stock).

Esta relación entre el programa maestro de producción y los procesos se muestra en la Figura 4.3.

En la Tabla 4.1 se muestra lo que podría constituir el plan maestro de producción para dos productos de Nancy's Specialty Foods, *quiche* de carne de cangrejo y *quiche* de espinacas.

FIGURA 4.2 ■ El plan agregado de producción proporciona la base para el desarrollo del programa maestro de producción detallado

Meses	Enero				Febrero			
Plan de producción agregado (muestra la cantidad total de amplificadores)	1.500				1.200			
Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8
Programa maestro de producción (muestra el modelo específico y la cantidad de amplificadores que hay que producir)								
Amplificador de 240 vatios	100		100		100		100	
Amplificador de 150 vatios		500		500		450		450
Amplificador de 75 vatios			300				100	

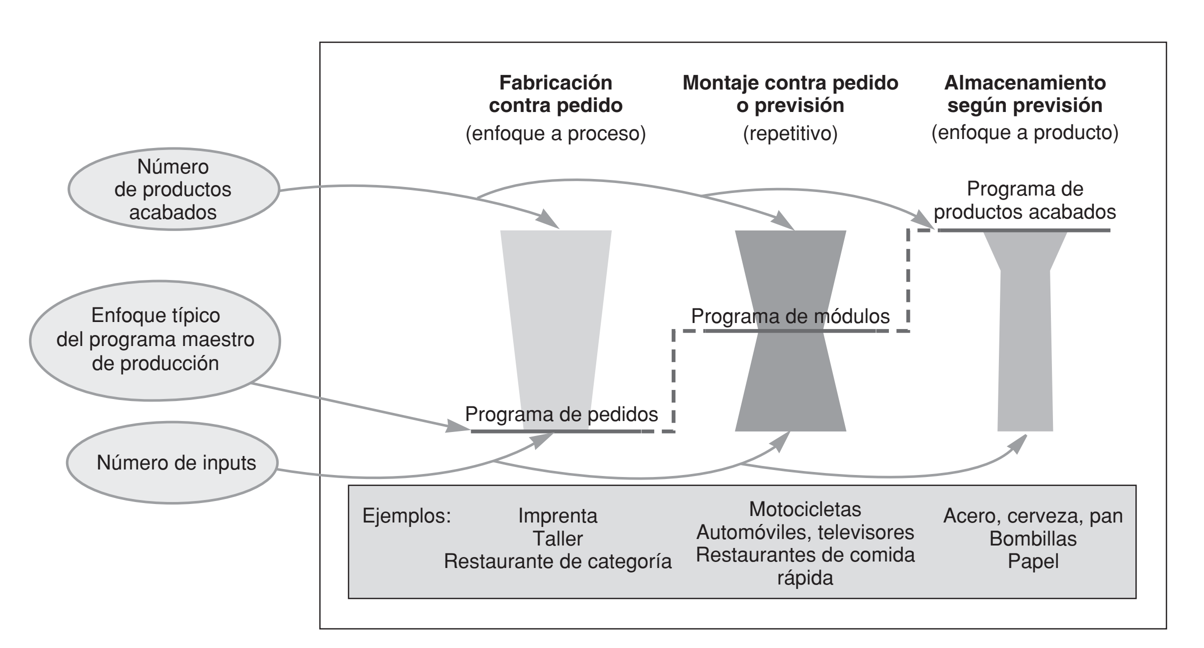


FIGURA 4.3 ■ Enfoque típico del programa maestro de producción en tres estrategias de proceso

TABLA 4.1 ■ Plan maestro de producción de los productos *quiche* de carne de cangrejo y *quiche* de espinacas de Nancy's Specialty Foods

Necesidades brutas para el *quiche* de carne de cangrejo

Día	6	7	8	9	10	11	12	13	14	y así sucesivamente
Cantidad	50		100	47	60		110	75		

Necesidades brutas para el *quiche* de espinacas

Día	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16 y así sucesivamente
Cantidad	100	200	150			60	75		100	

Listas de materiales

Definir lo que va incorporado en cada producto puede parecer sencillo, pero en la práctica puede ser difícil. Tal y como vimos en el Capítulo 5 del volumen *Decisiones Estratégicas*, para ayudar en este proceso, los productos fabricados se definen mediante una lista de materiales. Una **lista de materiales** (*bill of materials,* BOM) es una lista con las cantidades de componentes, ingredientes y materiales necesarios para elaborar un producto. Los planos individuales no sólo describen las dimensiones físicas, sino también cualquier proceso especial, así como las materias primas que constituyen cada parte componente del producto. Nancy's Specialty Foods tiene una receta para el *quiche* donde se especifican los ingredientes y las cantidades. También Collins Industries posee un completo conjunto de planos para una ambulancia. Ambas son listas de materiales (aunque a una la llamemos receta y las dos varíen un tanto en alcance).

Lista de materiales (BOM) Lista de los componentes, su descripción y la cantidad necesaria de cada uno de ellos necesaria para hacer una unidad de un producto.

Debido a que, a menudo, hay prisas para introducir un nuevo producto en el mercado, los planos y las listas de materiales pueden estar incompletos o incluso no existir. Por otra parte, los planos y las listas de materiales (u otras formas de especificaciones) a menudo contienen errores en cuanto a dimensiones, cantidades, o en otras innumerables áreas. Cuando se identifican los errores, se crean las notificaciones de cambio de ingeniería (*Engineering change notice:* ECN), complicando nuevamente el proceso. Una *notificación de cambio de ingeniería* es un cambio o corrección de un plano o de una lista de materiales.

Una forma de cómo una lista de materiales define un producto es creando una estructura del producto. El Ejemplo 1 muestra cómo desarrollar la estructura del producto y cómo "explotarla" para poner de manifiesto las necesidades de cada componente. La lista de materiales del artículo A, en el Ejemplo 1, está formada por los artículos B y C. Se lla-

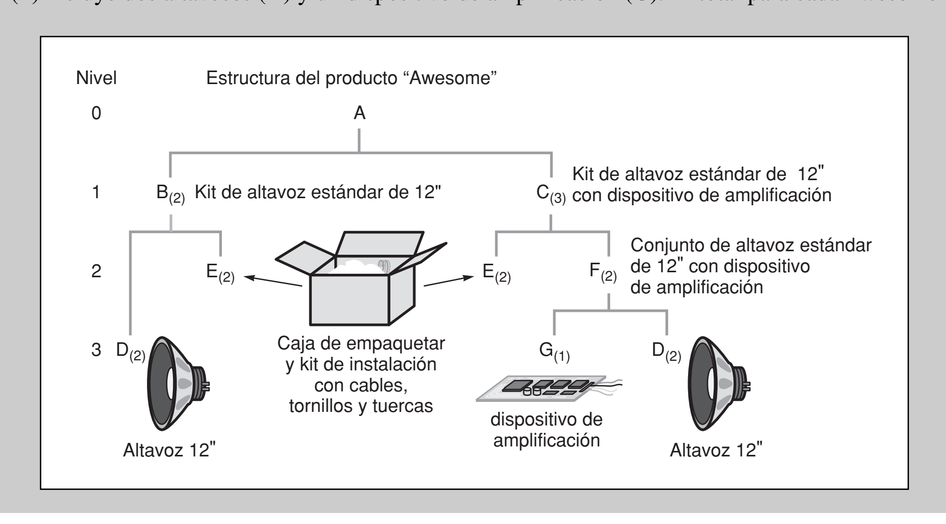
EJEMPLO 1

Desarrollar la estructura de un producto y las necesidades de componentes

Speaker Kits, Inc., empaqueta componentes de equipos de alta fidelidad para pedidos por correo. Los componentes de su mejor kit de altavoces, el "Awesome (Formidable)" (A), incluye dos kits de altavoz estándar de 12 pulgadas (B) y tres kits de altavoz con dispositivos de amplificación (C).

Cada B consta de dos altavoces (D) y dos cajas de envío cada una con un kit de instalación (E). Cada uno de los tres kits estéreo de 300 vatios (C) tiene dos altavoces con dispositivo de amplificación (F) y dos kits de instalación (E). Cada altavoz con dispositivo de amplificador (F) incluye dos altavoces (D) y un dispositivo de amplificación (G). El total para cada Awesome





es de cuatro altavoces estándar de 12 pulgadas y doce altavoces de 12 pulgadas con dispositivo de amplificación. (La mayoría de los compradores necesitan audífonos al cabo de dos años, y al menos un caso está pendiente en los tribunales por los daños estructurales causados en el dormitorio de un hombre). Como podemos ver, la demanda de B, C, D, E, F y G es totalmente dependiente del programa maestro de producción de A: los kits de altavoces Awesome. Con esta información podemos construir la estructura del producto (*véase* la figura de la página anterior).

Esta estructura tiene cuatro niveles: 0, 1, 2 y 3. Hay cuatro padres: A, B, C y F. Cada artículo padre tiene al menos un nivel por debajo. Los artículos B, C, D, E, F y G son componentes porque cada artículo tiene al menos un nivel por encima. En esta estructura, B, C y F son a la vez *padres* y *componentes*. El número entre paréntesis indica cuántas unidades de ese artículo concreto son necesarias para elaborar el artículo inmediatamente superior a él. Así, $B_{(2)}$ significa que se emplean dos unidades de B por cada unidad de A, y $F_{(2)}$ significa que se emplean dos unidades de F por cada unidad de C.

Una vez que hemos desarrollado la estructura del producto, podemos determinar el número de unidades de cada artículo que son necesarias para satisfacer la demanda de un nuevo pedido de 50 kits de altavoces Awesome, como mostramos a continuación:

Parte B:	$2 \times$ número de A =	(2)(50) =	100
Parte C:	$3 \times$ número de A =	(3)(50) =	150
Parte D:	$2 \times$ número de B + $2 \times$ número de F =	(2)(100) + (2)(300) =	800
Parte E:	$2 \times$ número de B + $2 \times$ número de C =	(2)(100) + (2)(150) =	500
Parte F:	$2 \times$ número de C =	(2)(150) =	300
Parte G:	$1 \times$ número de F =	(1)(300) =	300

Por tanto, para 50 unidades de A necesitaremos 100 unidades de B, 150 unidades de C, 800 unidades de D, 500 unidades de E, 300 unidades de F y 300 unidades de G.

ma *padres* a todos los artículos que están por encima de un nivel, y a los artículos que se encuentran por debajo del nivel se los denomina *componentes* o *hijos.*

Las listas de materiales no sólo especifican las necesidades de los mismos, sino que también son útiles para calcular costes y pueden servir como una lista de artículos para ser entregados al personal de producción o de montaje. Cuando se utilizan las listas de materiales de esta forma, normalmente se denominan *listas de extracción o de recogida (pick lists).*

Listas modulares Las listas de materiales pueden estar organizadas en torno a módulos de productos (*véase* el Capítulo 5 del volumen *Decisiones Estratégicas*). Los *módulos* no son productos acabados para su venta posterior, sino componentes que pueden producirse y montarse en otras unidades. A menudo son componentes principales del producto acabado u opciones del producto. Las listas de materiales de los módulos se llaman **listas modulares**. Las listas de materiales a veces están organizadas como módulos (y no como parte de un producto final) debido a que la planificación de la producción y la producción misma se facilitan si se organizan en torno a relativamente pocos módulos, en vez de alrededor de una multitud de montajes finales. Por ejemplo, una empresa puede fabricar 138.000 productos finales diferentes, pero puede tener sólo 40 módulos que se mezclan y combinan para producir los 138.000 productos finales. La empresa elabora un plan agregado de producción y prepara su programa maestro de producción para los 40 módulos, no para las 138.000 configuraciones de producto final. Este enfoque permite preparar un programa maestro de producción para un número razonable de artículos (la franja estrecha del

Listas modulares
Listas de materiales organizadas por submontajes principales o por opciones del producto.

gráfico de en medio de la Figura 4.3) y posponer el montaje. Los 40 módulos pueden entonces ser configurados en el montaje final según pedidos específicos.

Listas de planificación y listas fantasmas Otras dos clases especiales de listas de materiales son las listas de planificación y las listas fantasmas. Las **listas de planificación** están creadas para asignar un padre artificial a la lista de materiales. Estas listas se utilizan (1) cuando queremos agrupar submontajes para reducir el número de artículos que hay que programar y (2) cuando queremos entregar kits (conjuntos) al departamento de producción. Por ejemplo, no sería eficiente entregar artículos baratos, tales como arandelas o clavijas, con cada uno de los numerosos submontajes, así que llamamos a esto un *kit* y generaremos una lista de planificación. La lista de planificación especifica el *kit* que ha de utilizarse. Consecuentemente, una lista de planificación puede también denominarse **kit de materiales** o **kit**. Las **listas fantasmas de materiales** son listas de materiales de componentes, normalmente submontajes que existen sólo temporalmente. Estos componentes entran directamente en otro montaje y nunca son almacenados. Por tanto, los componentes de las listas fantasmas de materiales están codificados para recibir un tratamiento especial; los plazos de entrega (*lead times*) son cero, y se manejan como una parte integral de su artículo padre. Un ejemplo es un conjunto de un eje de transmisión con engranajes y rodamientos que se incorpora directamente a la transmisión.

Listas de planificación (o kits)
Agrupación de materiales creados para asignar un padre artificial a la lista de materiales.

Listas de materiales fantasma
Listas de materiales por componentes, generalmente montajes, que existen temporalmente; nunca se consideran en inventario.

Codificación de nivel inferior El código de nivel inferior de un artículo en una lista de materiales es necesario cuando el mismo artículo aparece en diferentes niveles de la lista de materiales. La **codificación de nivel inferior** indica que el artículo se ha de codificar en el nivel más bajo en el que aparezca. Por ejemplo, el artículo D en el Ejemplo 1 podría estar codificado como componente de B y aparecer en el nivel 2. Pero como D es también componente de F, y F está en el nivel 2, el artículo D pasa a ser un artículo de nivel 3. La codificación de nivel inferior es un convenio para permitir que el cálculo de las necesidades del artículo sea más sencillo. Cuando la lista de materiales tiene miles de artículos o cuando las necesidades se calculan frecuentemente, la facilidad o la rapidez de cálculo se convierten en un asunto de mucha importancia.

Codificación de nivel inferior
Número que identifica los artículos con el nivel más bajo en que aparecen.

La codificación de nivel inferior asegura que un artículo esté siempre en el nivel más bajo en que se utiliza.

Registros de inventario exactos

Tal y como vimos en el Capítulo 2, el conocimiento de lo que existe en stock es el resultado de una buena gestión de inventario. Una buena gestión de inventario es una necesidad absoluta de que funcione un sistema MRP. Si la empresa todavía no ha alcanzado por lo menos el 99 por ciento de exactitud en los registros, entonces la planificación de las necesidades de materiales no funcionará.

Órdenes de compra pendientes

El conocimiento de los pedidos pendientes debe ser una consecuencia de unos departamentos de compras y de control de inventarios bien gestionados. Cuando se efectúan los pedidos de compra, el personal de producción debe disponer de los registros de esos pedidos y de sus fechas de entrega programadas. Sólo con buenos datos de compras pueden los directivos preparar buenos planes de producción y hacer funcionar de forma eficaz un sistema de MRP.

Para fabricantes como Harley-Davidson, que produce un gran número de productos acabados a partir de un número relativamente pequeño de opciones, las listas de materiales modulares proporcionan una solución eficaz.

Plazos (*Lead times*) de cada componente

Una vez que los directivos determinan cuándo son necesarios los productos, hay que determinar cuándo adquirirlos. El tiempo necesario para adquirir (es decir, comprar, producir o

Plazo de fabricación/ aprovisionamiento
En los sistemas de compras, es el tiempo entre el reconocimiento de la necesidad de un pedido y su recepción; en los sistemas de producción, es el lanzamiento, la espera, el transporte interno, la preparación y el proceso de cada componente producido.

montar) cada artículo se conoce como **plazo** (*lead time*). El plazo de un producto manufacturado es el tiempo requerido para *transportar internamente, preparar* y *montar* o *procesar cada componente*, y se denomina *plazo de fabricación.* En un artículo comprado, el plazo es el tiempo que transcurre desde que se lanza el pedido de compra hasta que el artículo está disponible para la producción, y se denomina *plazo de aprovisionamiento o entrega*.

Cuando la lista de materiales de los conjuntos de altavoces "Awesome" (A), en el Ejemplo 1, se gira 90 grados según las agujas del reloj, y se modifica añadiendo los plazos, de fabricación o entrega, de cada componente (*véase* la Tabla 4.2), tenemos una *estructura de producto situada (escalonada) en el tiempo*. El tiempo en esta estructura se muestra en el eje horizontal de la Figura 4.4, con fecha de finalización de fabricación del artículo en la semana ocho. Entonces, a partir de ahí se van restando los plazos de fabricación o entrega de los diferentes artículos/componentes, para saber cuándo deben lanzarse o estar fabricados o aprovisionados.

TABLA 4.2 ■ Plazos (*Lead times*) de los equipos de altavoces Awesome (A)

Componente	Plazo
A	1 semana
B	2 semanas
C	1 semana
D	1 semana
E	2 semanas
F	3 semanas
G	2 semanas

ESTRUCTURA DE MRP

Aunque la mayoría de los sistemas de MRP están informatizados, el procedimiento de MRP es sencillo y puede realizarse a mano. El programa maestro de producción, las listas de materiales, los registros de inventario y compras, y los plazos de cada artículo constituyen los ingredientes de un sistema de planificación de las necesidades de materiales (*véase* la Figura 4.5).

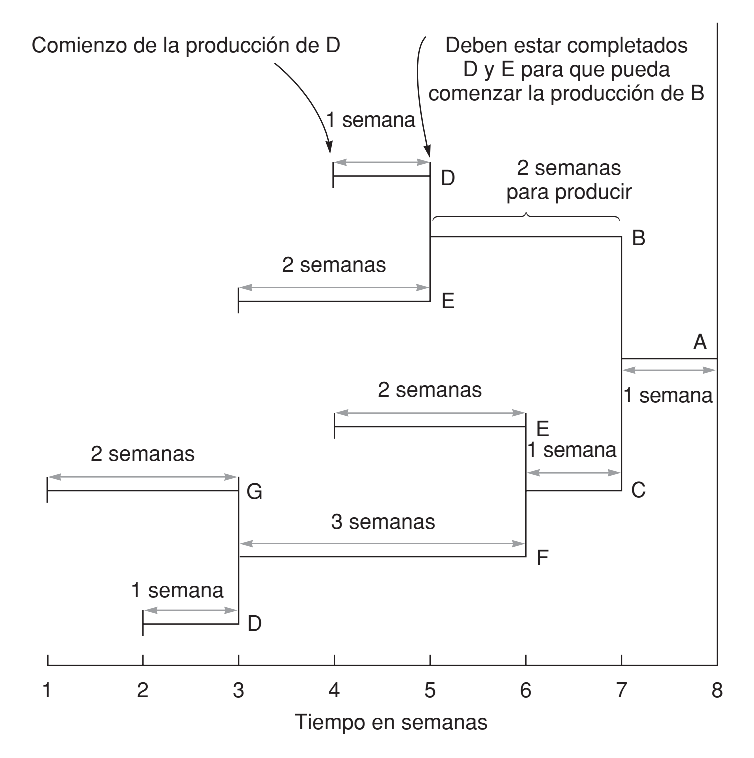


FIGURA 4.4 ■ Estructura de producto situada en el tiempo

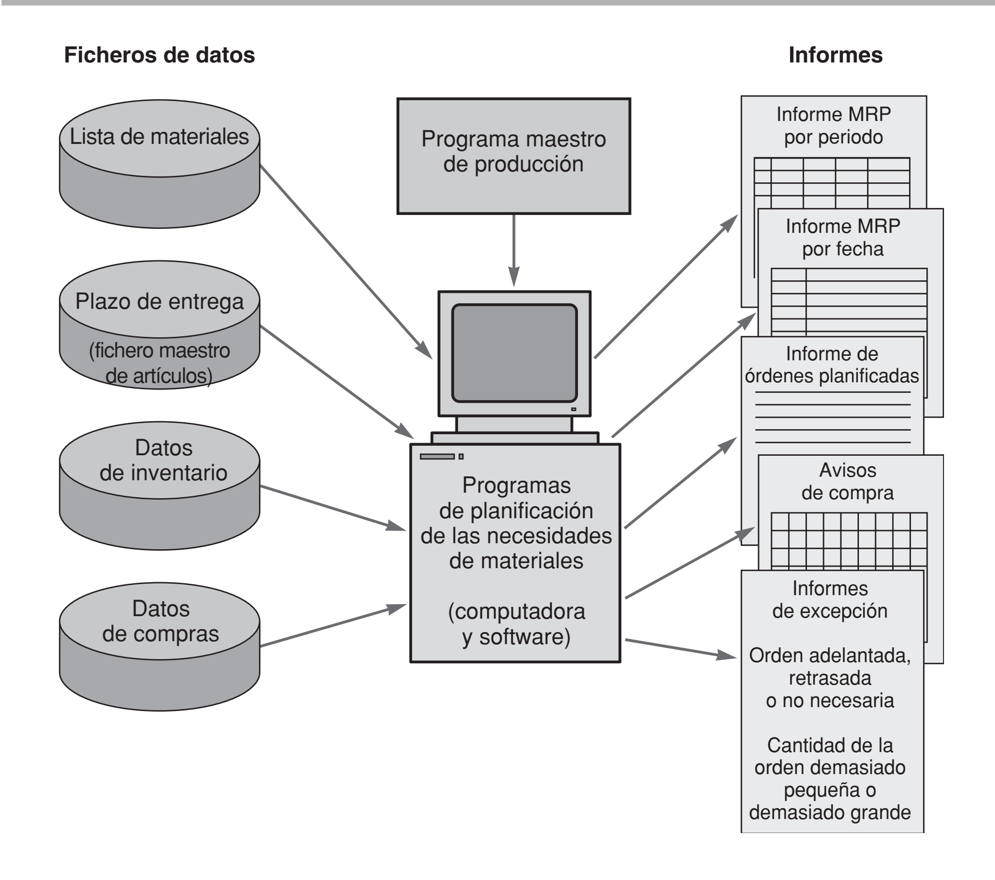


FIGURA 4.5 ■ Estructura del sistema MRP

El software MRP se utiliza ampliamente debido a que muchas organizaciones han de encarar situaciones de demanda dependiente.

Una vez que estos componentes estén disponibles y sean exactos, el siguiente paso es construir un plan de necesidades brutas de materiales. El **plan de necesidades brutas de materiales** es un programa, como se muestra en el Ejemplo 2. Combina un programa maestro de producción (que requiere una unidad de A en la semana 8) y la estructura escalonada en el tiempo (BOM con *lead times*) (Figura 4.4). Nos indica cuándo debe pedirse un artículo a los proveedores si no hay actualmente inventario disponible, o cuándo debe iniciarse la producción de un artículo para satisfacer la demanda del producto terminado en una fecha determinada.

Plan de necesidades brutas de materiales
Plan que muestra la demanda total de un artículo (antes de la sustracción de la existencia disponible en inventario y de las recepciones programadas) y (1) cuándo debe ser pedido a los proveedores o (2) cuándo debe comenzar la producción para satisfacer su demanda en una fecha concreta.

Hasta ahora hemos considerado las *necesidades brutas de materiales*, lo que supone que no hay existencias disponibles. Cuando hay inventario disponible, entonces elaboramos el *plan de necesidades netas*. Cuando estamos considerando el inventario disponible, debemos tener en cuenta que muchos artículos en stock corresponden a submontajes o a partes. Si las necesidades brutas de los kits de altavoces Awesome (A) son de 100 unidades y hay 20 altavoces disponibles, la necesidad neta de los kits de altavoces Awesome (A) será de 80 (es decir, 100 – 20). Sin embargo, cada kit de altavoces Awesome disponible en existencias contiene dos B. Como resultado, la necesidad de B disminuye en 40 unidades de B (20 kits A disponibles × 2 B por A). Por tanto, si hay existencias disponibles de un artículo padre, disminuyen las necesidades de los artículos padre y de todos sus componentes, ya que cada kit Awesome contiene los componentes de los artículos de nivel inferior. El Ejemplo 3 muestra cómo crear un plan de necesidades netas.

Los Ejemplos 2 y 3 consideraban únicamente el producto A: el kit de altavoces Awesome, y su finalización únicamente en la semana 8. Eran necesarias 50 unidades de A en la semana 8. Normalmente, sin embargo, existe una demanda de muchos productos a lo

EJEMPLO 2

Cálculo de las necesidades brutas

Cada kit de altavoces Awesome (artículo A del Ejemplo 1) necesita todos los artículos de la estructura del producto A. Los plazos de fabricación/aprovisionamiento se muestran en la Tabla 4.2. Utilizando esta información, elaboramos el plan de necesidades brutas de materiales y diseñamos un plan de producción que satisfaga la demanda de 50 unidades de A para la semana 8. Este resultado se muestra en la Tabla 4.3.

Se pueden interpretar las necesidades brutas de materiales, que se muestran en la Tabla 4.3, como sigue: Si queremos 50 unidades de A para la semana 8, debemos empezar a montar A en la semana 7. De esta manera, en la semana 7, necesitaremos 100 unidades de B y 150 de C. Estos dos artículos necesitan dos semanas y una semana, respectivamente, para ser producidos. La producción de B, por lo tanto, debería comenzar en la semana 5, y la producción de C debería empezar en la semana 6 (el plazo de entrega se resta de la fecha requerida para estos artículos). Retrocediendo, podemos realizar los mismos cálculos para todos los demás artículos. Debido a que D y E se utilizan en dos lugares diferentes de la estructura del kit de altavoces Awesome, hay dos entradas en cada uno de sus registros (E y D).

El plan de necesidades de materiales muestra cuándo debe comenzarse y finalizarse la producción/compra de cada artículo para tener las 50 unidades de A en la semana 8.

TABLA 4.3 ■ Plan de necesidades brutas de materiales para 50 kits de altavoces Awesome (A)

	Semana								Plazo de entrega
	1	2	3	4	5	6	7	8	
A. Fecha requerida								50	
Fecha de lanzamiento de la orden							50		1 semana
B. Fecha requerida							100		
Fecha de lanzamiento de la orden					100				2 semanas
C. Fecha requerida							150		
Fecha de lanzamiento de la orden						150			1 semana
D. Fecha requerida					200	300			
Fecha de lanzamiento de la orden			200	300					2 semanas
E. Fecha requerida						300			
Fecha de lanzamiento de la orden			300						3 semanas
F. Fecha requerida			600		200				
Fecha de lanzamiento de la orden		600		200					1 semana
G. Fecha requerida			300						
Fecha de lanzamiento de la orden	300								2 semanas

largo del tiempo. Para cada producto, la dirección debe preparar un plan maestro de producción (como vimos anteriormente en la Tabla 4.1). La producción programada de cada producto se agrega al programa maestro y finalmente al plan de necesidades netas de materiales. La Figura 4.6 muestra cómo programas maestros de diferentes productos, inclu-

Cálculo de las necesidades netas

EJEMPLO 3

En el Ejemplo 1 hemos desarrollado la estructura de un producto a partir de una lista de materiales, y en el Ejemplo 2 hemos desarrollado un plan de necesidades brutas. Dado el inventario disponible de la página siguiente, elaboramos ahora un plan de necesidades netas.

Tamaño del lote	Plazo (semanas)	Disponible	Stock de seguridad	Reservado	Código de nivel inferior	Identificación del artículo			Semana 1	2	3	4	5	6	7	8
Lote por lote	1	10	—	—	0	A	Necesidades brutas									50
							Recepción programada									
							Disponible previsto	10	10	10	10	10	10	10	10	10
							Necesidades netas									40
							Recepciones de órdenes planificadas									40
							Lanzamiento de órdenes planificadas								40	
Lote por lote	2	15	—	—	1	B	Necesidades brutas								80^A	
							Recepción programada									
							Disponible previsto	15	15	15	15	15	15	15	15	
							Necesidades netas								65	
							Recepciones de órdenes planificadas								65	
							Lanzamiento de órdenes planificadas						65			
Lote por lote	1	20	—	—	1	C	Necesidades brutas								120^A	
							Recepción programada									
							Disponible previsto	20	20	20	20	20	20	20	20	
							Necesidades netas								100	
							Recepciones de órdenes planificadas								100	
							Lanzamiento de órdenes planificadas							100		
Lote por lote	2	10	—	—	2	E	Necesidades brutas						130^B	200^C		
							Recepción programada									
							Disponible previsto	10	10	10	10	10	10			
							Necesidades netas						120	200		
							Recepciones de órdenes planificadas						120	200		
							Lanzamiento de órdenes planificadas				120	200				
Lote por lote	3	5	—	—	2	F	Necesidades brutas							200^C		
							Recepción programada									
							Disponible previsto	5	5	5	5	5	5	5		
							Necesidades netas							195		
							Recepciones de órdenes planificadas							195		
							Lanzamiento de órdenes planificadas				195					
Lote por lote	1	10	—	—	3	D	Necesidades brutas				390^F		130^B			
							Recepción programada									
							Disponible previsto	10	10	10	10					
							Necesidades netas				380		130			
							Recepciones de órdenes planificadas				380		130			
							Lanzamiento de órdenes planificadas			380		130				
Lote por lote	2	0	—	—	3	G	Necesidades brutas				195^F					
							Recepción programada									
							Disponible previsto				0					
							Necesidades netas				195					
							Recepciones de órdenes planificadas				195					
							Lanzamiento de órdenes planificadas		195							

Plan de las necesidades netas de materiales del producto A. *Observe que el superíndice es el origen de la demanda.*



Los Ejemplos 1 a 3 se explican con más detalle en el ejercicio Active Model 13.1 del CD-ROM y en un ejercicio al final del capítulo.

Artículo	Disponible
A	10
B	15
C	20
D	10
E	10
F	5
G	0

Un **plan de necesidades netas de materiales** incluye las necesidades brutas, el inventario disponible, las necesidades netas, la recepción de órdenes o pedidos planificados y los lanzamientos de órdenes o pedidos planificados de cada artículo. Empezamos con A y retrocedemos hacia los *componentes*. El plan de necesidades netas de materiales para el producto A se muestra en la tabla de la página anterior.

Necesidades netas de materiales
Resultado de ajustar las necesidades brutas con el inventario disponible y las recepciones programadas.

La construcción de un plan de necesidades netas es análoga a la construcción de un plan de necesidades brutas. Comenzando con el artículo A, retrocedemos para determinar las necesidades netas de todos los artículos. Para realizar estos cálculos, nos fijamos en la estructura del producto, el inventario disponible y los plazos de fabricación/entrega. Las necesidades brutas de A son de 50 unidades en la semana 8. Tenemos diez unidades de A disponibles en inventario; por tanto, las necesidades netas y la **recepción de orden planificada** son ambas de 40 artículos en la semana 8. Puesto que el plazo de fabricación de A es de una semana, el **lanzamiento de la orden planificada** es de 40 artículos en la semana 7 (*véase* la flecha que conecta la recepción de la orden con su lanzamiento). Haciendo referencia a la semana 7 y a la estructura del producto del Ejemplo 1, podemos ver que en la semana 7 son necesarios 80 (2 × 40) unidades de B y 120 (30 × 40) de C para tener un total de 50 artículos de A en la semana 8. La letra A a la derecha de la cifra de necesidad bruta de los artículos B y C indica que esta necesidad se genera como consecuencia de la demanda del artículo padre, A. Realizando el mismo tipo de análisis para B y C se obtienen las necesidades netas para D, E, F y G. Observe que el inventario disponible en la fila E en la semana 6 es cero, ya que el inventario disponible (10 unidades) fue utilizado para producir B en la semana 5. De igual modo, el inventario de D se ha utilizado para hacer F.

Recepción de órdenes planificadas
Cantidad planificada que ha de recibirse en una fecha futura.

Lanzamiento de órdenes planificadas
Fecha planificada para lanzar una orden.

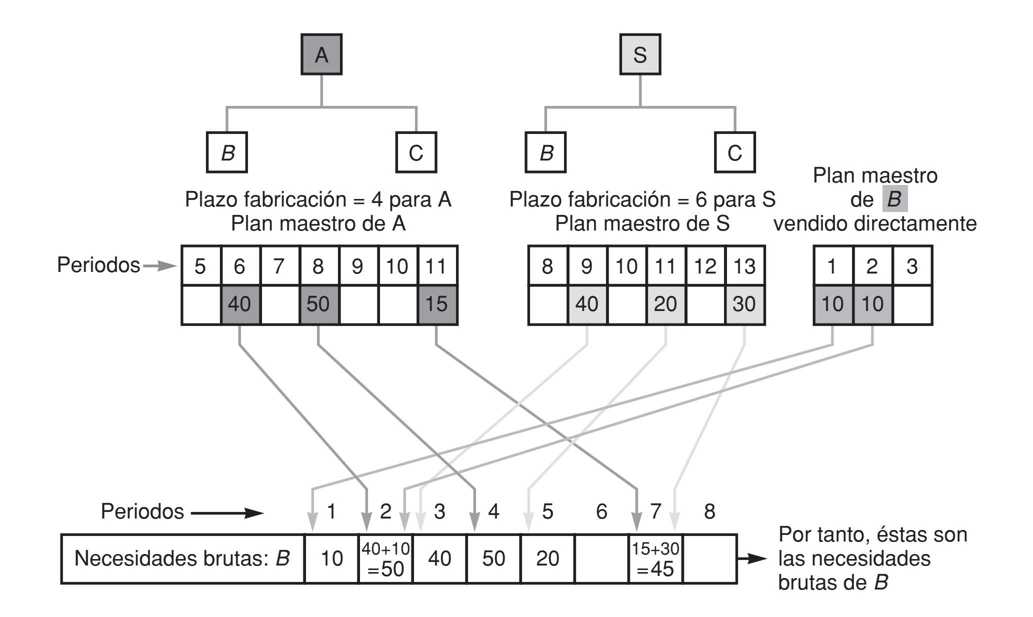


FIGURA 4.6 ■ Diferentes planes maestros crean el plan de necesidades brutas de B

Hay un "B" en cada A, y un "B" en cada S; además, se venden 10 B directamente en la semana 1, y 10 más que se venden directamente en la semana 2.

Tamaño del lote	Plazo (semanas)	Disponible	Stock de seguridad	Reservado	Código de nivel inferior	Identificación del artículo	Periodo		1	2	3	4	5	6	7	8
Lote por lote	1	0	0	10	0	B	Necesidades brutas									~~80~~ 90
							Recepciones programadas									0
							Disponible estimado	0	0	0	0	0	0	0	0	0
							Necesidades netas									90
							Recepciones de órdenes planificadas									90
							Lanzamiento de órdenes planificadas								90	

FIGURA 4.7 ■ Ejemplo de una hoja de planificación MRP para el artículo Z

yendo necesidades de componentes vendidos directamente, pueden crear un plan de necesidades brutas de materiales de un componente.

La mayoría de los sistemas de inventario también indican el número de unidades existentes en stock que han sido reservadas para una producción futura concreta, pero que todavía no han sido utilizadas o sacadas del almacén. Estos artículos se denominan normalmente artículos *reservados* o *asignados*. Los artículos reservados aumentan las necesidades y deben estar incluidos en una hoja de planificación MRP, tal y como se muestra en la Figura 4.7.

La cantidad asignada produce el efecto de aumentar los requisitos (o, alternativamente, de reducir la cantidad disponible). Por tanto, la lógica de unos requisitos de la MRP es

$$\underbrace{\left[\left(\begin{array}{c}\text{Necesidades}\\\text{brutas}\end{array}\right)+\left(\begin{array}{c}\text{Reser-}\\\text{vas}\end{array}\right)\right]}_{\text{Necesidades totales}}-\underbrace{\left[\left(\text{Disponible}\right)+\left(\begin{array}{c}\text{Recepciones}\\\text{programadas}\end{array}\right)\right]}_{\text{Inventario disponible}}=\begin{array}{c}\text{Necesidades}\\\text{netas}\end{array}$$

GESTIÓN DEL MRP

El plan de necesidades de materiales no es estático. Y debido a que los sistemas MRP se están integrando cada vez más con las técnicas justo a tiempo (JIT), estudiaremos ahora estos dos conceptos.

Dinámica del MRP

Las listas de materiales y los planes de necesidades de materiales se alteran a medida que se producen cambios en el diseño, en los programas y en los procesos de producción. Además, siempre que se modifica el programa maestro de producción se producen cambios en las necesidades de materiales. Independientemente de la causa de cualquier cambio, el modelo MRP puede ser manejado para reflejar estos cambios. De este modo, es posible la actualización del plan de necesidades.

Debido a los cambios que tienen lugar en los datos del MRP, es frecuente recalcular las necesidades del MRP una vez a la semana. Una de las características más prácticas del MRP es su capacidad de *replanificación* exacta cuando sea necesario. No obstante, muchas empresas prefieren no responder a pequeñas variaciones de la programación o a cambios menores, incluso siendo conscientes de ellos. Estos frecuentes cambios producen lo que se conoce como **nerviosismo del sistema**, y pueden crear gran confusión en los departamentos de compras y producción si se implementan. Por consiguiente, el personal de dirección de operaciones reduce tal nerviosismo evaluando la necesidad y el impacto de

Nerviosismo en el sistema
Cambios frecuentes en el sistema MRP.

los cambios antes de difundir peticiones a otros departamentos. Existen dos herramientas particularmente eficaces cuando se intenta reducir el nerviosismo del sistema de MRP.

Intervalos de tiempo congelados
Forma de permitir que una porción del programa maestro sea designada como "no reprogramable".

Pegging
En los sistemas de planificación de las necesidades de materiales, rastrear hacia arriba en la lista de materiales, desde el componente hasta el artículo padre.

La primera es la definición de intervalos de tiempo congelados. Los **intervalos de tiempo congelados** permiten que una porción del programa maestro sea designada como "no reprogramable". Así, esta porción del programa maestro no se modifica durante la regeneración periódica de los planes. La segunda herramienta disponible es la trazabilidad del origen de las necesidades (en inglés, *pegging*). El **pegging** consiste en rastrear hacia arriba en la lista de materiales, desde el artículo componente hasta el padre. Al rastrear hacia arriba, el planificador de la producción puede determinar el motivo de la necesidad y evaluar si es necesario hacer un cambio en el programa.

Con el MRP, el director de operaciones *puede* reaccionar a la dinámica del mundo real. Determinar con qué frecuencia el directivo debe aplicar esos cambios en la empresa requiere una opinión experta. Además, si el nerviosismo está causado por cambios justificados, entonces la respuesta adecuada de la dirección de operaciones debe ser la de investigar el entorno de producción, y no arreglarlo vía el MRP.

MRP y JIT

El MRP no proporciona una detallada programación temporal, sólo planifica. El MRP nos dirá que es necesario que se haya finalizado un trabajo en una semana o día determinado, pero no nos dirá que el Trabajo X tiene que ejecutarse en la Máquina A, comenzando a las 10:30 horas y teniendo que estar terminada a las 11:30, para poder pasar a continuación a la Máquina B. El MRP es también una técnica de planificación con plazos de fabricación/aprovisionamiento *fijos*. Los plazos fijos pueden ser una limitación. Por ejemplo, el plazo para producir 50 unidades puede variar sustancialmente del plazo para producir 5 unidades. Esta limitación complica la unión entre el MRP y el sistema de justo a tiempo (JIT). Lo que necesitamos es una forma de lograr que MRP sea más reactivo a mover los materiales rápidamente en pequeños lotes. Un sistema MRP combinado con el JIT puede ofrecer lo mejor de ambos mundos. El MRP proporciona el plan y un panorama exacto de las necesidades; a continuación el JIT mueve rápidamente los materiales en pequeños lotes, reduciendo el inventario de producto en curso. Veamos cuatro planteamientos para integrar ambos sistemas: la programación a capacidad finita, el utilizar pequeñas unidades de tiempo en el MRP (*time bucket*), el flujo equilibrado y los supermercados (*supermarkets*).

Buckets
Unidades de tiempo en un sistema de planificación de necesidades de materiales (MRP).

Programación a capacidad finita La mayoría de los softwares MRP realizan una carga de trabajo sin ninguna restricción en los *buckets*. Los **buckets** son las unidades de tiempo utilizadas en la planificación, normalmente una semana. Habitualmente, cuando es necesario hacer un trabajo en una determinada semana, el MRP asigna el trabajo a esa semana sin tener en cuenta la capacidad disponible en ella. Por tanto, se considera que el MRP es una técnica de planificación a capacidad *infinita*. Con frecuencia, como es de esperar, ésa no es una situación realista. La planificación a capacidad finita (*Finite Capacity Scheduling,* FCS), que analizaremos en el Capítulo 5, tiene en cuenta la capacidad de las máquinas y de los departamentos, que es *finita*, y de ahí viene el nombre. La FCS proporciona una exacta programación necesaria para un rápido movimiento de materiales. En la actualidad estamos presenciando la convergencia de la FCS y el MRP. Sofisticados sistemas FCS modifican el output de los sistemas MRP para proporcionar una planificación finita.

Enfoque de pequeños buckets El MRP es una excelente herramienta para la gestión de los recursos y de la planificación en las instalaciones enfocadas al proceso, es decir, en los talleres. Entre estas instalaciones podemos incluir talleres de máquinas, hospitales y res-

taurantes, donde los plazos de fabricación son relativamente estables y se espera un pobre equilibrio entre los diferentes centros de trabajo. Los programas se basan a menudo en órdenes de trabajo, y el tamaño de los lotes viene dado por el tamaño indicado por las listas de materiales "explosionadas". En estas empresas, el MRP se puede integrar con el sistema JIT mediante los siguientes pasos:

Paso 1: Reducir los buckets del MRP de semanales a diarios o quizá incluso horarios. Los **buckets**, como ya hemos indicado, son las unidades de tiempo en un sistema MRP. Aunque en los ejemplos de este capítulo hemos utilizado *buckets* semanales, actualmente muchas empresas utilizan buckets diarios o incluso de fracciones de día. Algunos sistemas no utilizan **buckets**, y en ellos todos los datos temporales tienen asignada una fecha en vez de estar asignados a periodos de tiempo o buckets.

Sistema sin buckets
La situación en el tiempo de los datos está referida a una fecha en vez de estar asignada a periodos de tiempo o buckets.

Paso 2: Las recepciones planificadas que son parte de órdenes planificadas de la empresa en el sistema MRP, se comunican a las áreas de trabajo a efectos de producción y se utilizan para secuenciar la producción.

Paso 3: El inventario se mueve a través de la fábrica siguiendo un sistema JIT.

Paso 4: Cuando los productos están acabados, pasan a inventario (generalmente inventario de productos acabados) en la forma habitual. La recepción de estos productos en inventario reduce las cantidades necesarias para las próximas órdenes planificadas en el sistema de la MRP.

Paso 5: Se utiliza un sistema conocido como deducción posterior (*back flush*) para rebajar el volumen de inventario. En la **deducción posterior** se utiliza la lista de materiales para rebajar de inventario las cantidades de los componentes en el momento en que cada unidad de producto acabado se ha finalizado.

Deducción posterior (*back flush*)
Sistema para rebajar de inventario, restando todos los componentes de la lista de materiales en el momento en que la unidad de producto acabado se ha finalizado.

El centro de atención de estas instalaciones pasa a ser el cumplimiento de los programas. Nissan consigue aplicar este planteamiento con éxito mediante comunicaciones informáticas con los proveedores. Los programas se confirman, se actualizan o se cambian cada 15 o 20 minutos. Los proveedores suministran mercancías de 4 a 16 veces por día. El cumplimiento del programa maestro es del 99 por ciento, y se mide cada hora. La puntualidad en las entregas de los proveedores es del 99,9 por ciento y para las partes fabricadas es del 99,5 por ciento.

Enfoque del flujo equilibrado El MRP proporciona la planificación y la programación necesarias en operaciones repetitivas, como en las líneas de montaje de Harley-Davidson, Whirpool y otros miles de empresas. En estos entornos, la planificación MRP se combina con la ejecución JIT. La parte JIT utiliza *kanbans* (fichas de reposición), señales visibles y proveedores fiables para "estirar" los materiales a través de la fábrica. En estos sistemas, la ejecución se consigue manteniendo un cuidadosamente equilibrado flujo de material hacia las áreas de montaje con reducidos tamaños de lote[2].

Supermercado (*Supermarket*) Otra técnica que aúna MRP y JIT es la utilización de un "supermercado". En muchas empresas, submontajes, componentes y material de ferretería (tornillos, arandelas, juntas…) son comunes para diversos productos. En estos casos, no es necesario lanzar órdenes para estos artículos comunes con toda la parafernalia de la tradi-

[2] Para un estudio relacionado con este enfoque, *véase* Sylvain Landry, Claude R. Duguay, Sylvain Chausse y Jean-Luc Themens, "Integrating MRP, Kanban, and Bar-Coding Systems to Achieve JIT Procurement", *Production and Inventory Management Journal* (primer trimestre de 1997): 8-12.

cional deducción de los plazos de entrega, como hacemos en un sistema MRP. Se pueden mantener los submontajes, componentes y material de ferretería en una zona común, que a veces se denomina **supermercado**, adyacente a las zonas de producción donde se utilizan. Los artículos del supermercado se reabastecen siguiendo un sistema kanban/JIT.

Supermercado
Zona de inventario que tiene artículos comunes que se reabastecen mediante un sistema kanban.

TÉCNICAS DE LOTIFICACIÓN

Un sistema de MRP es una excelente forma de determinar los planes de producción y las necesidades netas. Sin embargo, cuando tenemos una necesidad neta, debemos tomar una decisión respecto a *cuánto a pedir*. Esta decisión se denomina **decisión de lotificación** o **de dimensionado del lote**. En un sistema MRP, hay diferentes formas de determinación del tamaño de los lotes; normalmente, el software comercial de MRP permite utilizar diferentes técnicas para determinar el tamaño del lote. Veremos a continuación algunas de ellas.

Decisiones para determinar el tamaño de los lotes (lotificación)
Proceso de, o técnicas utilizadas en, determinar el tamaño del lote

Lote a lote En el Ejemplo 3 utilizamos una técnica de lotificación conocida como **lote a lote**, que producía exactamente lo que se necesitaba. Esta decisión es coherente con el objetivo de un sistema MRP, que es satisfacer las necesidades de la demanda *dependiente*. Así, un sistema MRP debería producir las unidades solamente cuando se necesiten, sin stock de seguridad y sin anticipación de órdenes futuras. Cuando es económico efectuar órdenes frecuentemente y se han implementado técnicas de inventario justo a tiempo (JIT), el sistema de lote a lote puede ser muy eficiente. Sin embargo, en los casos en los que los costes de preparación son significativos, o la dirección ha sido incapaz de implementar el JIT, la técnica de lote a lote puede resultar cara. El Ejemplo 4 utiliza el criterio de lote a lote y determina el coste para 10 semanas de demanda.

Lote a lote
Técnica para determinar el tamaño del lote que genera exactamente lo necesario para satisfacer lo planificado.

EJEMPLO 4

Lotificación lote a lote

Speaker Kits, Inc., desea calcular los costes de lanzamiento y almacenamiento de inventario bajo un criterio de lote a lote. Speakers Kits ha determinado que, para el conjunto de altavoz estándar de 12 pulgadas con dispositivo de amplificación, el coste de preparación es de 100 dólares, y el coste de almacenamiento es de 1 dólar por periodo. El programa de producción, reflejado en las necesidades netas de conjuntos, es el siguiente:

Problema de lotificación MRP: Técnica lote a lote

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Necesidades brutas		35	30	40	0	10	40	30	0	30	55
Recepciones programadas											
Disponible previsto	35	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Necesidades netas		0	30	40	0	10	40	30	0	30	55
Recepciones de órdenes planificadas			30	40		10	40	30		30	55
Lanzamiento de órdenes planificadas		30	40		10	40	30		30	55	

Coste de almacenamiento = 1 dólar/unidad/semana; coste de preparación = 100 dólares; necesidades brutas medias por semana = 27; plazo = 1 semana.

En la tabla se muestra la solución de determinación del tamaño del lote y su coste, utilizando la técnica del lote a lote. El coste de almacenamiento es cero, pero 7 preparaciones independientes (cada una asociada a un pedido) dan un coste total de 700 dólares.

Cantidad económica de pedido Tal y como se vio en el Capítulo 2, puede utilizarse la técnica EOQ para determinar el tamaño de los lotes. Pero, como indicábamos entonces, la técnica EOQ es preferible cuando existe una demanda independiente *relativamente constante*, no cuando *conocemos* la demanda. La EOQ es una técnica estadística que utiliza medias (tal como la demanda media de un año), mientras que el procedimiento MRP supone una demanda (dependiente) conocida reflejada en un programa maestro de producción. Los directores de operaciones deberían sacar provecho de la información de demanda cuando es conocida, en vez de suponer que la demanda es constante. Analizamos la EOQ en el Ejemplo 5.

Es preferible utilizar MRP cuando la demanda es dependiente. Las técnicas estadísticas tales como EOQ se utilizan preferiblemente cuando la demanda es independiente.

EJEMPLO 5

Lotificación con EOQ

Speaker Kits, Inc., con un coste de preparación de 100 dólares y un coste de almacenamiento por semana de 1 dólar, analiza su coste con tamaños de lote basados en criterios de EOQ. Utilizando las mismas necesidades que en el Ejemplo 4, las necesidades netas y los tamaños del lote son los siguientes:

Problema de lotificación MRP: Técnica de la EOQ

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Necesidades brutas		35	30	40	0	10	40	30	0	30	55
Recepciones programadas											
Disponible previsto	35	35	0	43	3	3	66	26	69	69	39
Necesidades netas		0	30	0	0	7	0	4	0	0	16
Recepciones de órdenes planificadas			73			73		73			73
Lanzamiento de órdenes planificadas		73			73		73			73	

Coste de almacenamiento = 1 dólar/unidad/semana; coste de preparación = 100 dólares; necesidades brutas medias por semana = 27; plazo = 1 semana.

La necesidad de 10 semanas da unas necesidades brutas de 270 unidades; por tanto, la necesidad semanal media es igual a 27 y la de 52 semanas (necesidad anual) será igual a 1.404 unidades. En el Capítulo 2 vimos que el modelo EOQ es:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

donde D = necesidades anuales = 1.404
S = coste de preparación = 100 dólares
H = coste de almacenamiento anual por unidad
= 1 dólar × 52 semanas = 52 dólares

Q^* = 73 unidades
Preparaciones = 1.404/73 = 19 al año
Coste de preparación = 19 × 100 dólares = 1.900 dólares
Coste de mantenimiento = $\frac{73}{2}$ × (1 dólar × 52 semanas) = 1.898 dólares
Coste de preparación + coste de almacenamiento = 1.900 + 1.898 = 3.798 dólares

Nissan planifica al límite. En Nissan, MRP ayuda a reducir el inventario a estándares de primera clase mundial. El montaje de automóviles de primera clase mundial exige que las partes adquiridas tengan una rotación de poco más de una vez al día, y que la rotación total se aproxime a 150 veces por año.

Equilibrio de unidad-periodo (*Part Period Balancing*, PPB)
Técnica de ordenar para inventario que equilibra los costes de preparación y de almacenamiento cambiando el tamaño del lote para reflejar las necesidades de tamaño del próximo lote en el futuro.

Unidad-periodo económica (*Economic Part Period*, EPP)
Es el periodo de tiempo donde la relación entre los costes de preparación y los costes de almacenamiento se iguala.

Observe que el coste de almacenamiento real variará de los 730 dólares calculados, en función de la tasa de necesidades reales. Podemos ver en la tabla anterior de nuestro ejemplo de 10 semanas, que los costes son realmente 400 dólares para cuatro preparaciones, más un coste de almacenamiento de 318 unidades a 1 dólar por semana, para dar un total de 718 dólares. Puesto que la necesidad no era constante, el coste calculado era de hecho menor que el coste teórico de la EOQ (730 dólares), pero mayor que el obtenido mediante la regla del lote a lote (700 dólares). Si se hubiese producido alguna rotura de stock, estos costes también deberían haberse añadido a nuestro coste real de EOQ de 718 dólares.

Equilibrio de unidad-periodo El **equilibrio de unidad-periodo (*Part Period Balancing*, PPB)** es un enfoque más dinámico para equilibrar los costes de preparación y de almacenamiento[3]. Este método utiliza información adicional cambiando el tamaño del lote, para reflejar las necesidades a las que deberá hacer frente el siguiente lote en el futuro. El PPB intenta equilibrar el coste de preparación y el de almacenamiento para una situación de demandas conocidas. El equilibrio de unidades entre periodos define una **unidad-periodo económica (*Economic Part Period,* EPP)**, que es la relación entre el coste de preparación y el coste de almacenamiento. Para nuestro ejemplo de Speaker Kits, la EPP =100 dólares/1 dólar = 100 unidades. Por lo tanto, el almacenamiento de 100 unidades durante un periodo costaría 100 dólares, exactamente el coste de una preparación. Análogamente, el almacenamiento de 50 unidades durante dos periodos también cuesta 100 dólares (2 periodos × 1 dólar × 50 unidades). El PPB simplemente suma necesidades hasta que el número de unidades-periodo se aproxima a la EPP: en este caso, 100. El Ejemplo 6 muestra la aplicación del equilibrio de unidad-periodo.

EJEMPLO 6

Determinación del tamaño de lote con el equilibrio de unidad-periodo

De nuevo, Speaker Kits, Inc., calcula los costes asociados a un tamaño de lote utilizando un coste de preparación de 100 dólares y un coste de almacenamiento de 1 dólar. Esta vez, sin embargo, para hacerlo se utiliza el equilibrio de unidad-periodo. Los datos se muestran en la siguiente tabla:

Cálculos PPB

Periodos combinados	Prueba de dimensión del lote (necesidades netas acumuladas)	Unidades-periodo	Costes: Preparación	Costes: Almacenamiento	Costes: Total
2	30	0			
2, 3	70	40 = 40 × 1			
2, 3, 4	70	40			
2, 3, 4, 5	80	70 = **40 × 1** + **10 × 3**	100 +	70 =	170
2, 3, 4, 5, 6	120	230 = 40 × 1 + 10 × 3 + 40 × 4			

40 unidades almacenadas 1 periodo = 40$
10 unidades almacenadas 3 periodos = 30$

(Por tanto, combina los periodos 2 a 5; 70 es lo más cerca que vamos a estar de nuestra EPP de 100).

[3] J. J. DeMatteis, "An Economic Lot-Sizing Technique; The Part-Period Algorithms", *IBM Systems Journal* 7 (1968): 30-38.

6	40	0	
6, 7	70	30 = 30 × 1	
6, 7, 8	70	30 = 30 × 1 + 0 × 2	
6, 7, 8, 9	100	120 = 30 × 1 + 30 × 3	100 + 120 = 220

(Por tanto, combina los periodos 6 a 9; 120 es lo más cerca que vamos a estar de nuestra EPP de 100).

10	55	0	100 + 0 = 100
			300 + 190 = 490

Problema de lotificación MRP: Técnica PPB

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Necesidades brutas		35	30	40	0	10	40	30	0	30	55
Recepciones programadas											
Disponible previsto	35	35	0	50	10	10	0	60	30	30	0
Necesidades netas		0	30	0	0	0	40	0	0	0	55
Recepciones de órdenes planificadas			80				100				55
Lanzamiento de órdenes planificadas		80				100				55	

Coste de almacenamiento = 1 dólar/unidad/semana; coste de preparación = 100 dólares; necesidades brutas medias por semana = 27; Plazo = 1 semana.

El valor de EPP es 100 (coste de preparación dividido entre coste de almacenamiento = 100 dólares/1 dólar). El primer lote es para cubrir los periodos 1, 2, 3, 4 y 5, y es de 80.

Los costes totales son de 490 dólares, con unos costes totales de preparación de 300 dólares, y unos costes totales de almacenamiento de 190 dólares.

*Muchos programas de MRP, como Resource Manager para Excel y DB, están comercialmente disponibles en el mercado. Se puede encontrar una versión demo para los estudiantes en **www.usersolutions.com.***

Algoritmo de Wagner-Whitin El **procedimiento de Wagner-Whitin** es un modelo de programación dinámica que añade cierta complejidad al cálculo del tamaño del lote. Supone un horizonte temporal finito, más allá del cual no existen necesidades netas adicionales. Sin embargo, proporciona buenos resultados[4].

Procedimiento Wagner-Whitin
Técnica para el cálculo del tamaño del lote que supone, para llegar a una estrategia de ordenar, un horizonte de tiempo finito después del cual no hay nuevas necesidades netas.

Resumen de la lotificación En los tres ejemplos de lotificación de los kits de altavoces, hemos encontrado los siguientes costes:

Lote a lote	700 dólares
EOQ	730 dólares
Equilibrio de unidad-periodo	490 dólares

Estos ejemplos no deberían, no obstante, llevar al personal de operaciones a conclusiones precipitadas sobre la técnica preferida para determinar la dimensión del lote. En teoría, deben calcularse nuevos tamaños de lote siempre que hay un cambio en el plan o en el tamaño del lote en cualquier punto de la jerarquía del MRP. Pero, en la práctica, tales cambios provocan inestabilidad y el nerviosismo al que nos referimos con anterioridad en este

[4] Dejamos el análisis del algoritmo a los manuales sobre programación matemática. El algoritmo Wagner-Whitin da un coste de 455 dólares para los datos de los Ejemplos 4, 5 y 6.

capítulo. Por tanto, no se llevan a cabo esos cambios frecuentes. Esto significa que todos los tamaños de los lotes son incorrectos, porque el sistema de producción no puede responder a cambios frecuentes.

Por lo general, debería utilizarse el método de lote a lote siempre que sea económico. Este método es la meta. Los lotes pueden modificarse cuando sea necesario para tener en cuenta incrementos por rechazos (*scrap allowances*), restricciones del proceso (por ejemplo, un proceso de tratamiento térmico puede requerir un lote de un determinado tamaño), o lotes de compra de materias primas (por ejemplo, una carga de camión de sustancias químicas puede estar disponible únicamente en un tamaño de lote). No obstante, debe tenerse cuidado antes de realizar cualquier modificación del tamaño del lote, porque la modificación puede causar una distorsión importante en las auténticas necesidades en los niveles inferiores de la jerarquía MRP. Cuando los costes de preparación son significativos y la demanda es razonablemente estable, el equilibrio de unidade-periodo (PPB), el algoritmo Wagner-Whitin, o incluso el EOQ, deberían proporcionar resultados satisfactorios. Una preocupación excesiva por el tamaño de los lotes provoca una falsa precisión debido a la propia dinámica del MRP. Un tamaño de lote adecuado solamente puede determinarse después del hecho, en función de lo que realmente ocurrió en términos de necesidades.

AMPLIACIONES DEL MRP

En los últimos años se han producido numerosas ampliaciones del MRP. En este apartado revisaremos cuatro de ellas.

MRP de bucle cerrado

La planificación de las necesidades de materiales de bucle cerrado es un sistema MRP que proporciona *feedback* (información de retroalimentación) a la planificación desde el sistema de control de inventario. Específicamente, un **sistema MRP de bucle cerrado** proporciona información al plan de capacidad de producción, al programa maestro de producción, y en última instancia al plan de producción (como se muestra en la Figura 4.8). Prácticamente todos los sistemas comerciales MRP son de bucle cerrado.

Sistema de MRP de bucle cerrado
Sistema que proporciona *feedback* (información de retroalimentación) al plan de capacidad, al programa maestro de producción y al plan de producción, de forma que la planificación pueda ser válida en todo momento.

Planificación de la capacidad

Según la definición de MRP de bucle cerrado, se obtiene retroalimentación (*feedback*) sobre la carga de trabajo desde cada centro de trabajo. Los **informes de carga** muestran las necesidades de recursos en un centro de trabajo para hacer frente a todo el trabajo actualmente asignado al mismo, a todo el trabajo planificado y a las órdenes esperadas. La Figura 4.9(a) muestra que la carga inicial del centro de fresado excede a la capacidad en las semanas 4 y 6. Los sistemas MRP de bucle cerrado permiten a los planificadores de producción mover el trabajo entre los periodos de tiempo para alisar la carga o, al menos, ajustarla a la capacidad (ésta es la columna de "Planificación de la capacidad" de la Figura 4.8). El sistema MRP de bucle cerrado puede entonces volver a programar todos los artículos en el plan de necesidades netas [*véase* la Figura 4.9 (b)].

Informes de carga
Informes que muestran las necesidades de recursos en un centro de trabajo para todos los trabajos actualmente asignados a ese centro, así como para todas las órdenes planificadas y esperadas.

Las tácticas para alisar la carga y minimizar el efecto de variar el plazo (*lead time*) son las siguientes:

1. *Solapamiento:* reduce el plazo de entrega. Consiste en enviar piezas a la siguiente operación antes de que el lote se haya completado en la primera operación.
2. *División de operaciones:* manda el lote a dos máquinas diferentes que realizan la misma operación. Esto conlleva una preparación adicional, pero da como resulta-

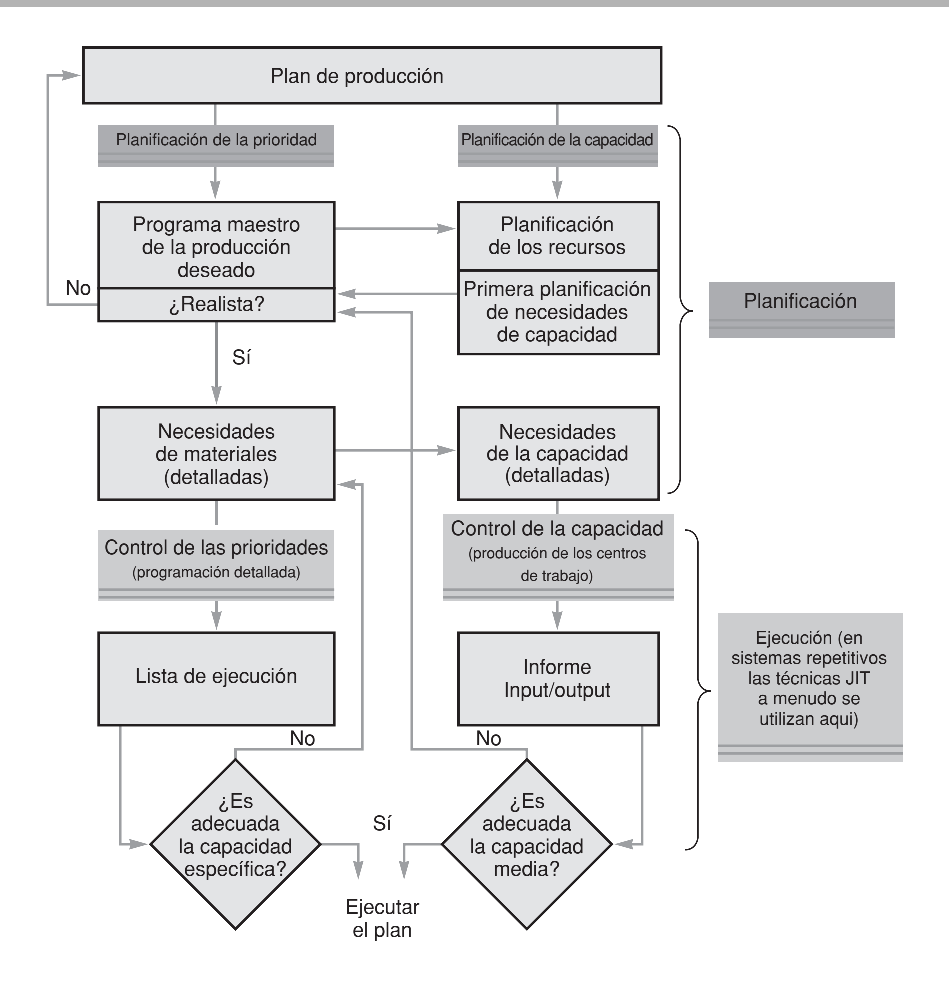


FIGURA 4.8 ■ Planificación de las necesidades de materiales de bucle cerrado

Fuente: Adaptado de *Capacicy Planning and Control Study Guide* (Alexandria, VA: American Production and Inventory Control Society). Reproducido con autorización.

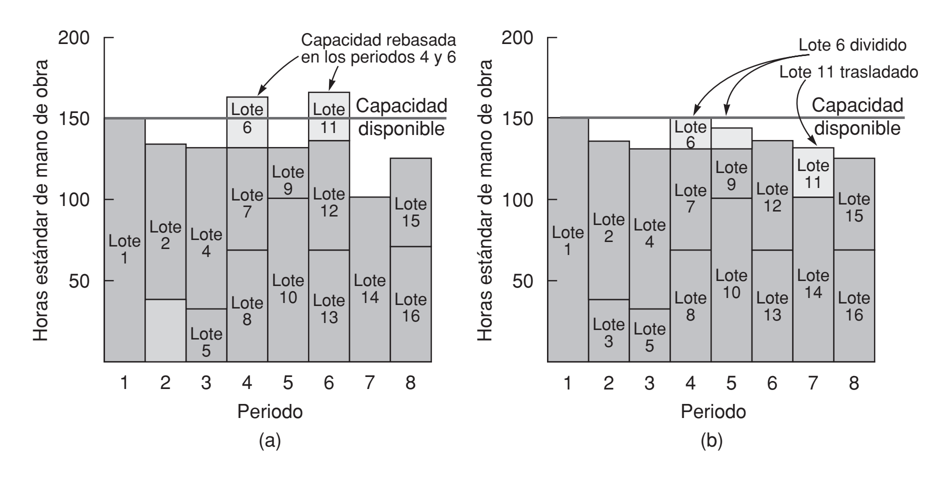


FIGURA 4.9 ■ (a) Perfil inicial de las necesidades de recurso para un centro de fresado. (b) Perfil alisado de las necesidades de recurso para un centro de fresado

do tiempos de proceso del lote más cortos, ya que en cada máquina sólo trata una parte del lote.

3. *División del lote:* implica dividir la orden y llevar a cabo parte del lote por anticipado.

Cuando la carga de trabajo sobrepasa continuamente la capacidad del centro de trabajo, las tácticas que acabamos de enumerar no resultan adecuadas. Esto puede significar que es necesario ampliar la capacidad. Las opciones disponibles para ampliar la capacidad son vía el personal, la maquinaria, las horas extras o mediante la subcontratación.

Planificación de las necesidades de materiales II (MRP II)

Planificación de las necesidades de materiales II (MRP II) Sistema que permite, con el MRP implantado, que se amplíen los datos de inventario con otras variables de recursos; en este caso, el MRP se convierte en la planificación de recursos materiales.

La **planificación de las necesidades de materiales II** es una técnica muy potente. Una vez que una empresa tiene un MRP en marcha, los datos de inventario se pueden completar con las horas de mano de obra, con el coste de los materiales (más que con la cantidad), con el coste del capital, o con prácticamente cualquier otro recurso. Cuando el MRP se utiliza de esta forma, se denomina normalmente **MRP II**, y la palabra *necesidades* es sustituida por *recursos*. MRP significa entonces planificación de *recursos* materiales (o planificación de recursos de fabricación).

Por ejemplo, hasta ahora en nuestra exposición del MRP hemos programado unidades (cantidades). Sin embargo, cada una de estas unidades requiere recursos además de sus componentes. Estos recursos adicionales son las horas empleadas por la mano de obra, horas de trabajo de la maquinaria y cuentas a pagar (en efectivo). Cada uno de estos recursos puede utilizarse en un formato MRP de la misma forma que hemos utilizado las cantidades. La Tabla 4.4 muestra cómo determinar las horas de mano de obra, horas de maquinaria y el dinero que un programa maestro de producción necesitará en cada periodo. Estas necesidades se comparan con las capacidades respectivas (es decir, de horas de mano de obra, de horas de maquinaria, de capital y así sucesivamente), de forma que los directores de operaciones pueden elaborar programas factibles.

Para facilitar el funcionamiento del sistema MRP II, la mayoría de los programas informáticos de MRP II disponen de vínculos con otros archivos informáticos que proporcionan o reciben datos del sistema de MRP. Compras, planificación de la producción, planificación de la capacidad y gestión de almacenes son algunos ejemplos de este tipo de integración de datos.

TABLA 4.4 ■ Planificación de los recursos de fabricación (MRP II). Utilizando la lógica de la MRP, pueden determinarse y programarse de forma precisa recursos como mano de obra, horas de maquinaria y coste. Aquí se muestra la demanda semanal de mano de obra, horas de maquinaria y cuentas a pagar por cada 100 unidades.

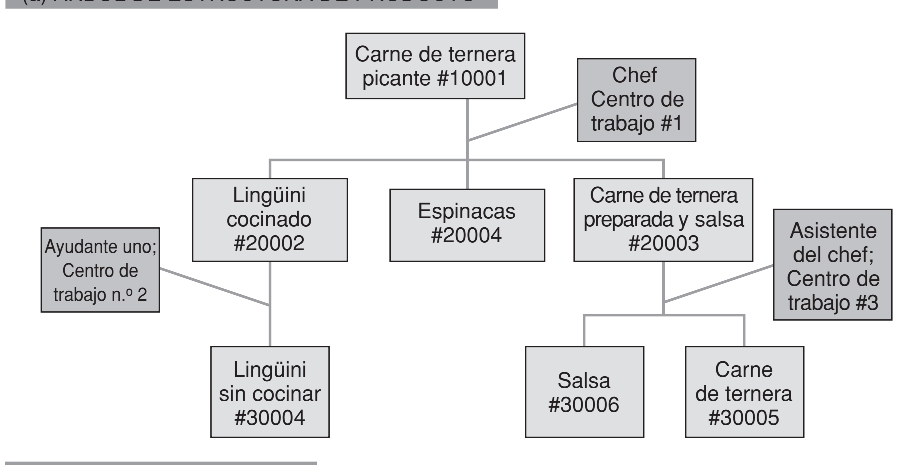
	Semana			
	5	6	7	8
A. Unidades (plazo de fabricación 1 semana)				100
Mano de obra: 10 horas/unidad				1.000
Maquinaria: 2 horas/unidad				200
Cuentas a pagar: 0 dólares/unidad				0
B. Unidades (plazo de entrega 2 semanas, cada A requiere 2 unidades B)			200	
Mano de obra: 10 horas/unidad			2.000	
Maquinaria: 2 horas/unidad			400	
Cuentas a pagar: materias primas a 5 dólares/unidad			1.000	
C. Unidades (plazo de entrega 4 semanas, cada A requiere 3 unidades C)	300			
Mano de obra: 2 horas/unidad	600			
Maquinaria: 1 hora/unidad	300			
Cuentas a pagar: materias primas a 10 dólares/unidad	3.000			

MRP EN SERVICIOS

La demanda de muchos servicios o artículos de servicios se clasifica como demanda dependiente cuando está directamente relacionada con, o derivada de, la demanda de otros servicios. Estos servicios a menudo requieren árboles de estructura de producto, listas de materiales y de mano de obra, y programación. MRP puede hacer una gran contribución al rendimiento operativo de estos servicios. A continuación se ofrecen ejemplos sobre restaurantes, hospitales y hoteles.

Restaurantes En los restaurantes, los ingredientes y acompañamientos (pan, verduras y condimentos) son los componentes típicos de una comida. Estos elementos dependen de la demanda de comidas. La comida es un artículo final en el programa maestro. La Figura 4.10 muestra (a) un árbol de estructura de producto y (b) una lista de materiales para un plato de ternera picante, un plato principal de una comida muy vendido en un restaurante

(a) ÁRBOL DE ESTRUCTURA DE PRODUCTO



(b) LISTA DE MATERIALES

Número de albarán	Descripción	Cantidad	Unidad de medida	Coste unitario
10001	Carne de ternera picante	1	Ración	—
20002	Lingüini cocinado	1	Ración	—
20003	Carne de ternera preparada y salsa	1	Ración	—
20004	Espinacas	0,1	Bolsa	0,94
30004	Lingüini sin cocinar	0,5	Libra	—
30005	Carne de ternera	1	Ración	2,15
30006	Salsa	1	Ración	0,80

(c) LISTA DE TRABAJO DE LA CARNE DE TERNERA PICANTE

Centro de trabajo	Operación	Tipo de mano de obra	Horas de mano de obra: Tiempo de preparación	Horas de mano de obra: Tiempo de ejecución
1	Montar el plato	Chef	0,0069	0,0041
2	Cocinar el lingüini	Ayudante uno	0,0005	0,0022
3	Cocinar la ternera y la salsa	Asistente del chef	0,0125	0,0500

FIGURA 4.10 ■ Árbol de estructura de producto, lista de materiales y lista de trabajo para la carne de ternera picante

Fuente: Adaptado de John G. Wacker, "Effective Planning and Cost Control for Restaurants", *Production and Inventory Management* (first quarter 1985): 60. Reimpreso con permiso de American Production and Inventory Control Society.

de Nueva Orleans. Observe que los diferentes componentes de la ternera picante (que son: ternera, salsa y lingüini) son preparados por distintos empleados de cocina [*véase* la parte (a) de la Figura 4.10]. Estas preparaciones también requieren distintas cantidades de tiempo para completarse. La Figura 4.10 (c) muestra una lista de tareas (mano de obra) para la preparación del plato de ternera. En ella se enumeran las operaciones que se han de realizar, la secuencia de éstas y las necesidades de mano de obra para cada una de ellas (tipo de mano de obra y horas de trabajo).

Hospitales El MRP también se aplica en hospitales, especialmente cuando se trata de cirugía que requiere equipos, materiales y suministros. El hospital Park Plaza de Houston y muchos proveedores de los hospitales, por ejemplo, utilizan la técnica para mejorar la programación y la gestión del costoso inventario quirúrgico.

Hoteles La cadena de hoteles Marriott define una lista de materiales y una lista de trabajo cuando renueva cada una de sus habitaciones. Los directores de los hoteles Marriott explotan el BOM para calcular las necesidades de materiales, mobiliario y decoración. MRP proporciona entonces las necesidades netas y un programa que será utilizado por el departamento de compras y los subcontratistas.

PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS DE DISTRIBUCIÓN (DRP)

Planificación de los recursos de distribución (DRP)
Plan de reaprovisionamiento situado en el tiempo para todos los niveles de una red de distribución.

Cuando se utilizan las técnicas dependientes en la cadena de suministros, éstas se denominan planificación de los recursos de distribución (DRP: *Distribution Resource Planning*). La **planificación de los recursos de distribución (DRP)** es un plan de reaprovisionamiento del inventario, a lo largo del tiempo, para todos los niveles de la cadena de suministros. Sus procedimientos y lógica son análogos a los del MRP. DRP requiere lo siguiente:

1. Necesidades brutas, que son lo mismo que la demanda esperada o las previsiones de ventas.
2. Niveles mínimos de inventario para alcanzar los niveles de servicio a los clientes.
3. Plazos de fabricación/aprovisionamiento exactos.
4. Definición de la estructura de distribución.

Cuando se utiliza el DRP, la demanda esperada pasa a ser la necesidad bruta. Las necesidades netas se determinan restando el inventario disponible a las necesidades brutas. El procedimiento DRP comienza con la previsión de ventas al nivel detallista (o en el punto más distante de la red de distribución a la que se está suministrando). En todos los demás niveles se calculan las necesidades. Como en el caso del MRP, se revisa el inventario con el objetivo de satisfacer la demanda. Para que el stock llegue cuando se necesita, se desplazan las necesidades netas hacia atrás en el tiempo con el plazo de entrega necesario. La cantidad de la orden planificada lanzada pasa a ser la necesidad bruta en el siguiente nivel de la cadena de distribución.

El DRP *tira* del inventario a través del sistema. Este tirón se inicia cuando el nivel superior o minorista pide más stock. Se hacen asignaciones de cantidades para el nivel superior a partir del stock disponible y de la producción, tras ser modificadas para obtener economías en el transporte. El objetivo del sistema DRP es lograr un reabastecimiento frecuente, en pequeñas cantidades, dentro de los límites de pedidos y transportes económicos.

PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS DE LA EMPRESA (ERP)

La evolución de los sistemas MRP II, ligando clientes y proveedores al MRP II, ha dado lugar al desarrollo de los sistemas de Planificación de los Recursos de la Empresa (ERP: *Enterprise Resource Planning*). La **Planificación de los Recursos de la Empresa (ERP)** es un software que permite a las empresas (1) automatizar e integrar muchos de sus procesos de negocio, (2) compartir una base de datos y unas prácticas empresariales comunes en toda la empresa y (3) producir información en tiempo real. En la Figura 4.11 se muestra un diagrama esquemático de algunas de estas relaciones para el caso de una empresa manufacturera.

Planificación de los recursos de la empresa (ERP)
Sistema de información para identificar y planificar todos los recursos de la organización necesarios para tomar, hacer, enviar y contabilizar los pedidos de los clientes.

El objetivo de un sistema ERP es coordinar todas las actividades de negocio de una empresa, desde la evaluación de los proveedores hasta la facturación a los clientes. Pocas veces se alcanza completamente este objetivo, pero los sistemas ERP están evolucionando para convertirse en sistemas genéricos que aúnan diversos sistemas especializados. Esto se consigue utilizando una base de datos centralizada para facilitar el flujo de información entre las diversas funciones de la empresa. Los sistemas que están vinculados, y el cómo

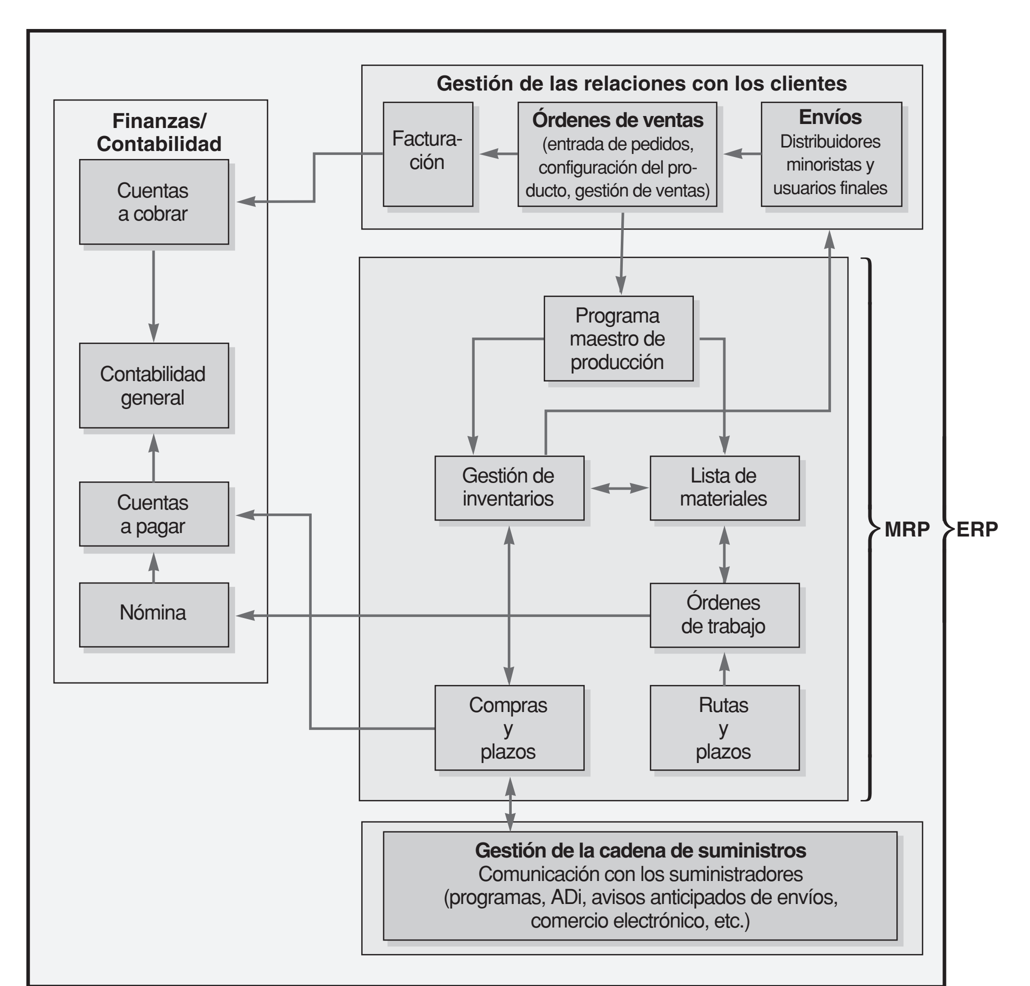


FIGURA 4.11 ■ Flujos de información en MRP y ERP que muestran la Gestión de las Relaciones con los Clientes (CRM), la Gestión de la Cadena de Suministros y Finanzas/ Contabilidad

Otras funciones como la de recursos humanos también se incluyen a menudo en el ERP.

se relacionan entre sí, depende de cada caso. Además de los elementos tradicionales de un MRP, los sistemas ERP normalmente suelen proporcionar información de gestión financiera y de recursos humanos (HR). Los sistemas ERP también incluyen:

- Software de *Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)* para permitir una sofisticada comunicación con los proveedores, el comercio electrónico, y aquellas actividades necesarias para una logística y almacenamiento eficiente. La idea consiste en unir las operaciones (MRP) a las actividades de compras/aprovisionamiento, a la gestión de materiales y a los proveedores, proporcionando las herramientas necesarias para la evaluación de estos cuatro elementos.
- Software de *Gestión de las Relaciones con los Clientes (CRM)*, que está centrado en los clientes de la empresa. El CRM está diseñado para servir de ayuda en el análisis de las ventas, en la definición y seguimiento de los clientes más rentables y en la gestión del personal de ventas.

Además de estos cinco módulos [MRP, finanzas, recursos humanos (HR), gestión de la cadena de suministros (SCM) y gestión de las relaciones con los clientes (CRM)], los proveedores de software de ERP habitualmente disponen de otras muchas opciones. Estos proveedores han diseñado módulos para proporcionar diversos paquetes de "soluciones" que están preparados para ajustarse a las necesidades de cada empresa. De hecho, el truco para estas grandes bases de datos y sistemas integrados ERP es desarrollar interfaces que permitan el acceso de ficheros externos a las bases de datos. SAP, un importante proveedor de ERP, ha desarrollado unos mil *interfaces de programación de aplicaciones de negocio* (*business aplication programming interfaces,* BAPIs) para poder acceder a su base de datos. De forma parecida, otros proveedores de ERP han diseñado sistemas para facilitar la integración con programas de otros proveedores independientes. La demanda de interfaces para los sistemas ERP es tan grande que se ha desarrollado una nueva industria de software para crear estas interfaces. Esta nueva categoría de programas se denomina, a veces, *middleware*, o software de *integración de aplicaciones de negocio* (*enterprise application integration,* EAI). Estas interfaces permiten ampliar los sistemas ERP ya que pueden integrarse con otros sistemas, como los de gestión de almacenes, intercambios logísticos, catálogos electrónicos, gestión de la calidad, y gestión del ciclo de vida del producto. Es este potencial de integración con otros sistemas, incluida la rica oferta existente de programas de otros proveedores, lo que hace que los ERP sean tan atractivos.

Además de la integración de datos, el software ERP promete reducir los costes de transacción e información puntual y precisa. El énfasis estratégico en los sistemas justo a tiempo y en unir más estrechamente a proveedores y distribuidores con la empresa, impulsa el deseo de integración en toda la empresa.

En un sistema de planificación de los recursos de la empresa los datos se introducen sólo una vez en una base de datos común, completa y consistente que es compartida por todas las aplicaciones. Por ejemplo, cuando un vendedor de Nike introduce en su sistema ERP un pedido de 20.000 pares de zapatillas deportivas para la cadena minorista Foot Locker, el dato está disponible de inmediato en la fábrica. Los equipos de producción empiezan a producir el pedido si no hay suficientes unidades en stock, contabilidad imprime la factura para Foot Locker, y el departamento de envíos comunica a Foot Locker la fecha de entrega prevista. El vendedor, o incluso el cliente, pueden controlar el progreso del pedido en cualquier momento. Todo esto se consigue utilizando los mismos datos y aplicaciones comunes. Sin embargo, para lograr esta homogeneidad, es necesario que los campos de los datos tengan exactamente la misma definición en toda la empresa. En el caso de Nike, esto significa la integración de las operaciones de las instalaciones productivas, des-

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

DIRECCIÓN DE BENETTON CON SOFTWARE ERP

Gracias al ERP, la empresa italiana de ropa Benetton puede afirmar, probablemente, que tiene la fábrica más rápida del mundo y la distribución más eficiente de la industria de la confección. Con sede en Ponzano, Italia, Benetton fabrica y envía 50 millones de prendas de vestir todos los años. Eso representa 30.000 cajas todos los días; cajas que tienen que estar rellenadas con los artículos exactos que se han pedido, y enviarse a la tienda precisa de la cadena de 5.000 tiendas de Benetton repartidas en 60 países. Este centro de distribución muy automatizado sólo necesita 19 trabajadores. Sin el ERP se necesitarían 400 trabajadores.

He aquí cómo funciona el software ERP:

1. **Pedidos.** Un vendedor de la tienda del sur de Boston descubre que se está quedando sin su jersey azul de máxima venta. Utilizando un portátil, su agente de ventas de Benetton local entra en el módulo de ventas ERP y teclea un pedido.
2. **Disponibilidad.** El software de inventario del ERP envía simultáneamente el pedido a la computadora central en Italia y averigua que se puede satisfacer de inmediato la mitad del pedido desde el almacén italiano. El resto se producirá y enviará en cuatro semanas.
3. **Producción.** Puesto que el jersey azul fue creado inicialmente con un software de diseño asistido por computadora (CAD), el software de fabricación ERP envía las especificaciones a la tricotosa correspondiente. Esta tricotosa fabrica las prendas.
4. **Almacenamiento.** Los jerseys azules se colocan en una caja, con una etiqueta de identificación por radiofrecuencia (RFID) con la dirección de la tienda de Boston, y se pone la caja en uno de los 300.000 compartimentos del almacén italiano. Un robot "sobrevuela" el almacén, leyendo las etiquetas RFID, recoge todas las cajas que estén destinadas a la tienda de Boston y las carga para su envío.
5. **Seguimiento del pedido.** El vendedor de Boston entra en el sistema ERP a través de Internet y ve que los jerseys (y otros artículos) están terminados y han sido enviados.
6. **Planificación.** A partir de los datos de los módulos de previsión y finanzas del sistema ERP, la directora de compras de Benetton determina que los jerseys azules tienen una elevada demanda y son muy rentables. Decide añadir tres nuevos tonos.

Fuentes: Frontline Solutions (abril de 2003): 54; y *MIT Sloan Management Review* (otoño de 2001): 46-53.

de Vietnam y China hasta México, en las unidades de negocio de todo el mundo, en muchas divisas, y con informes en diversos idiomas. El recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "Gestionando Benetton con software ERP" presenta un ejemplo de cómo el software ERP ayuda a integrar las operaciones de una empresa.

Cada proveedor de programas ERP produce productos exclusivos. Los grandes proveedores, como SAP AG (empresa alemana), BEA (Canadá), SSAGlobal, American Software, PeopleSoft/Oracle, MS Software (todas estadounidenses), venden software o módulos diseñados para industrias específicas (en la Figura 4.12 se muestra un conjunto de los módulos de SAP). Sin embargo, las empresas tienen que decidir si su forma de hacer negocio encajará en el estándar de los módulos del ERP. Si la empresa decide que no se ajusta al estándar del ERP, puede alterar su forma de hacer negocios para adaptarse al software. Pero este cambio puede tener un efecto negativo sobre sus procesos y podría reducir una ventaja competitiva. También, se puede personalizar el software ERP para satisfacer los requisitos específicos de los procesos de la empresa. Aunque los proveedores diseñan el software para que el proceso de personalización sea sencillo, muchas empresas gastan hasta cinco veces el coste del software para personalizarlo. Además de este gasto, la principal desventaja de la personalización es que, cuando los proveedores ofrecen una actualización o una mejora del software, hay que volver a escribir la parte personalizada de código para ajustarla a la nueva versión. Los programas ERP cuestan un mínimo de 300.000 dólares

Cobrar para pagar
Cubre todas las actividades relacionadas con finanzas
Cuentas a cobrar **Contabilidad general** **Gestión de caja**
Cuentas a pagar **Tesorería** **Gestión de activos**

Promocionar para entregar
Cubre todas las actividades orientadas a la relación con el cliente
Marketing
Presupuestos y proceso de pedidos
Transporte
Documentación y etiqueta
Servicio postventa
Garantías

Diseñar para fabricar
Cubre todas las actividades internas de producción
Ingeniería de diseño **Informes de planta**
Ingeniería de producción **Gestión de contratos/proyectos**
Mantenimiento de planta **Gestión de subcontratistas**

Contratar para jubilar
Cubre todas las actividades relacionadas con los recursos humanos y las nóminas
Horarios y asistencia **Nóminas**
Viajes y gastos

Comprador para pagar
Cubre todas las actividades de suministros
Suministros de proveedores
Solicitudes de compras
Pedidos de compras
Contratos de compras
Logística de entrada
Facturas/comprobación de proveedores
Pagos/liquidación a proveedores
Rendimiento de los proveedores

Preparar para enviar
Cubre la gestión interna del inventario
Almacenes **Previsiones** **Inventario físico**
Planificación de la distribución **Planificación del restablecimiento** **Manejo de materiales**

FIGURA 4.12 ■ Módulos de SAP para el ERP

Fuente: http://sapdirect.sap.com/USA/download/currentcatalog.pdf

para una empresa pequeña y cientos de millones de dólares para gigantes globales como General Motors y Coca-Cola. Es fácil ver, pues, que los sistemas ERP son caros, están llenos de problemas ocultos y requieren mucho tiempo para instalarlos. Como señala el recuadro sobre *Dirección de producción en acción*, Nestlé también descubrió que el ERP no es tarea fácil.

Ventajas y desventajas de los sistemas ERP

Hemos hecho alusión a algunas de las ventajas y desventajas de los sistemas ERP. A continuación se ofrece una lista más exhaustiva.

Ventajas

1. Permite la integración de los procesos de cadena de suministros, producción y administración.
2. Crea uniformidad en las bases de datos.
3. Puede incorporar los “mejores procesos” mejorados y remodelados.
4. Aumenta la comunicación y la colaboración entre las unidades de negocio y los distintos emplazamientos.

5. Tiene un software de base de datos con una codificación estándar.
6. Puede proporcionar una ventaja estratégica frente a los competidores.

Desventajas

1. Es muy caro comprarlo, y aún más caro personalizarlo.
2. Su implementación puede exigir grandes cambios en la empresa y en sus procesos.
3. Es un sistema tan complejo que muchas empresas no se pueden adecuar a él.
4. Requiere un proceso continuo de implementación que, a veces, no termina jamás.
5. La competencia en los sistemas ERP es limitada, por lo que la contratación de empleados para utilizar el sistema es un problema continuo.

ERP en el sector servicios

Los proveedores de programas ERP han desarrollado una serie de módulos de servicios para los mercados como la atención sanitaria, el gobierno, los comercios detallistas y los servicios financieros. Por ejemplo, Springer-Miller Systems ha creado un paquete de ERP para el mercado de los hoteles con un software que cumple todas las funciones de relación con clientes (*front-office*) y administrativas (*back-office*). Este sistema integra tareas como el mantenimiento de historiales de los huéspedes, reservas de habitaciones y reservas de mesa en restaurantes, programación de horarios para el campo de golf, y la gestión de múltiples propiedades en una cadena. PeopleSoft/Oracle combina el ERP con la gestión de la cadena de suministros para coordinar la preparación de comidas para los aviones. En la industria de la alimentación (gran distribución), estos sistemas de la cadena de suministros se conocen como sistemas de *respuesta eficiente al consumidor*. Igual que ocurre en las

Respuesta eficiente al consumidor (ECR)
Sistemas de gestión de la cadena de suministros en la industria de la alimentación (gran distribución); vinculan ventas a compras, inventarios, logística y producción.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

NO HAY NADA FÁCIL EN LA ERP

En 2000, el gigante de alimentos de consumo con sede en Suiza, Nestlé SA, firmó un contrato de 200 millones de dólares con SAP para comprar un sistema ERP. A estos 200 millones de dólares, Nestlé añadió 80 más de consultoría y mantenimiento. Todo esto se sumaba a los 500 millones que se gastaron en hardware y software como parte de la puesta a punto del centro de datos. Jeri Dunn, máximo responsable de sistemas de información en Nestlé USA, dice que el éxito de una implementación depende de que se cambien los procesos empresariales y se logre la "implicación" de todos los empleados. Entonces, y sólo entonces, se puede centrar la organización en la instalación del software. Con muchas divisiones autónomas, y 200 empresas y filiales operando en 80 países, el reto de cambiar los procesos y lograr la implicación de todos era considerable.

Normalizar los procesos es difícil, lleno de callejones sin salida y costosos errores. Nestlé tenía 28 puntos de entrada de pedidos de clientes, múltiples sistemas de compras, y ni idea del volumen de negocio que tenía con cada proveedor en particular; cada fábrica hacía sus propias compras con sus propias especificaciones. Nestlé USA estaba pagando 29 precios distintos por la vainilla al mismo proveedor.

Los nuevos procesos de negocio y bases de datos comunes permitieron obtener datos más coherentes y previsiones de demanda más fiables para los muchos productos de Nestlé. Nestlé hace ahora previsiones a nivel de centro de distribución. Esta mejor previsión permite a la empresa reducir el inventario y los costes de transporte que se producen cuando se envía demasiado producto a un lugar mientras se producen desabastecimientos en otros. Las mejoras de la cadena de suministros representaron hasta 325 millones de dólares ahorrados en Nestlé.

Los proyectos de ERP requieren, como es bien sabido, mucho tiempo, y mucho dinero, y este caso no fue la excepción; pero, tras tres años, se instalaron los últimos módulos del sistema de Nestlé, y Nestlé cree que la instalación es un éxito.

Fuentes: Materials Management and Distribution (marzo de 2003): 27; *Businessline* (12 de marzo de 2004): 1; y *CIO* (15 de mayo de 2002): 62-70.

manufacturas, los sistemas de **respuesta eficiente al consumidor** vinculan las ventas con compras, inventarios, logística y producción.

RESUMEN

La planificación de las necesidades de materiales (MRP) es la forma preferida de planificar la producción y el inventario cuando la demanda es dependiente. Para que el MRP funcione correctamente, la dirección debe disponer de un programa maestro, de necesidades exactas de todos los componentes, de registros exactos de inventario y de compras, y plazos de fabricación/aprovisionamiento precisos. La planificación de los recursos de distribución (DRP) es una técnica de reposición de stock situada en el tiempo para las cadenas de suministro, basada en los procedimientos y la lógica MRP.

La producción a menudo debe ser lote a lote en un sistema MRP, y los pedidos de reaprovisionamiento en un sistema DRP deben ser pequeños y frecuentes, dadas las restricciones de los costes de lanzamiento de pedidos y de transporte.

Tanto el MRP como el DRP, cuando se aplican correctamente, pueden contribuir de manera importante a la reducción del inventario a la vez que mejoran los niveles de servicio al cliente. Estas técnicas permiten al director de operaciones planificar y aprovisionar el stock pidiendo lo necesario (*need-to-order*) en lugar de, simplemente, realizar pedidos en un momento determinado (*time-to-order*).

El continuo desarrollo de los sistemas MRP ha dado lugar a la integración de los datos de producción con otras actividades, incluyendo las de la cadena de suministros y las de ventas. Como resultado, ahora tenemos sistemas integrados, orientados a bases de datos, de planificación de los recursos de la empresa (ERP). Estos sistemas que son caros y de difícil instalación, dan soporte, cuando tienen éxito, a las estrategias de diferenciación, de capacidad de respuesta y de liderazgo en costes.

TÉRMINOS CLAVE

Planificación de las necesidades de materiales (MRP) *(p. 153)*
Programa maestro de producción (MPS) *(p. 154)*
Lista de materiales *(p. 157)*
Listas modulares *(p. 158)*
Listas de planificación (o kits) *(p. 159)*
Listas fantasma de materiales *(p. 159)*
Codificación de nivel inferior *(p. 159)*
Plazo de fabricación/aprovisionamiento (*lead time*) *(p. 160)*
Plan de necesidades brutas de materiales *(p. 161)*
Necesidades netas de materiales *(p. 164)*
Recepción de órdenes planificadas *(p. 164)*
Lanzamiento de órdenes planificadas *(p. 164)*
Nerviosismo del sistema *(p. 165)*
Intervalos de tiempo congelados *(p. 166)*
Pegging *(p. 166)*
Buckets *(p. 166)*
Sistema sin buckets *(p. 167)*
Deducción posterior (*back flush*) *(p. 167)*
Supermercado *(p. 168)*
Decisión de lotificación o de dimensionado del lote *(p. 168)*
Lote a lote *(p. 168)*
Equilibrio de unidad-periodo (*Part Period Balancing*, PPB) *(p. 170)*
Unidad-periodo económica (*Economic Part Period*, EPP) *(p. 170)*
Procedimiento de Wagner-Whitin *(p. 171)*
Sistema MRP de bucle cerrado *(p. 172)*
Informe de carga *(p. 172)*
Planificación de las necesidades de materiales II (o Planificación de los recursos de fabricación) *(p. 174)*
Planificación de los recursos de la empresa (ERP) *(p. 177)*
Planificación de los recursos de distribución (DRP) *(p. 176)*
Respuesta eficiente al consumidor *(p. 172)*

CÓMO UTILIZAR EL SOFTWARE PARA RESOLVER LOS PROBLEMAS DE MRP

Hay muchos paquetes comerciales de software MRP a la venta, para empresas de cualquier tamaño. Entre el software MRP para pequeñas y medianas empresas están los paquetes de User Solutions, Inc., del que se puede encontrar una versión demo en www.usersolutions.com, y MAX, de Exact Software North America, Inc. Software para sistemas más grandes se puede obtener de SAP, CMS, BEA Oracle, i2 Technologies y muchos otros. El programa Excel OM que se entrega con este texto incluye un módulo de MRP (MRP), al igual que en POM para Windows. A continuación se explica cómo se utilizan ambos.

Cómo se utiliza Excel OM

La utilización del módulo MRP de Excel OM requiere la introducción cuidadosa de varios conjuntos de datos. En la pantalla inicial de MRP es donde introducimos (1) el número total de artículos en la lista de materiales BOM (incluido el artículo superior), (2) cómo queremos que se denominen los artículos del BOM (a saber, artículo n.º, parte, etc.), (3) el número total de periodos que se han de planificar, y (4) cómo queremos que se denominen los periodos (es decir, días, semanas, etc.).

La segunda pantalla de Excel OM para MRP proporciona los datos de entrada de la lista de materiales dentada. Aquí introducimos (1) el nombre de cada artículo en la lista de materiales (BOM), (2) la cantidad de ese artículo en el conjunto, y (3) la clasificación correcta (es decir, relación padre-hijo) para cada artículo. Los dentados son críticos ya que proporcionan la lógica para la explosión de la lista de materiales (BOM). El dentado debe seguir la lógica del árbol de estructura del producto con dientes para cada artículo ensamblado en ese conjunto.

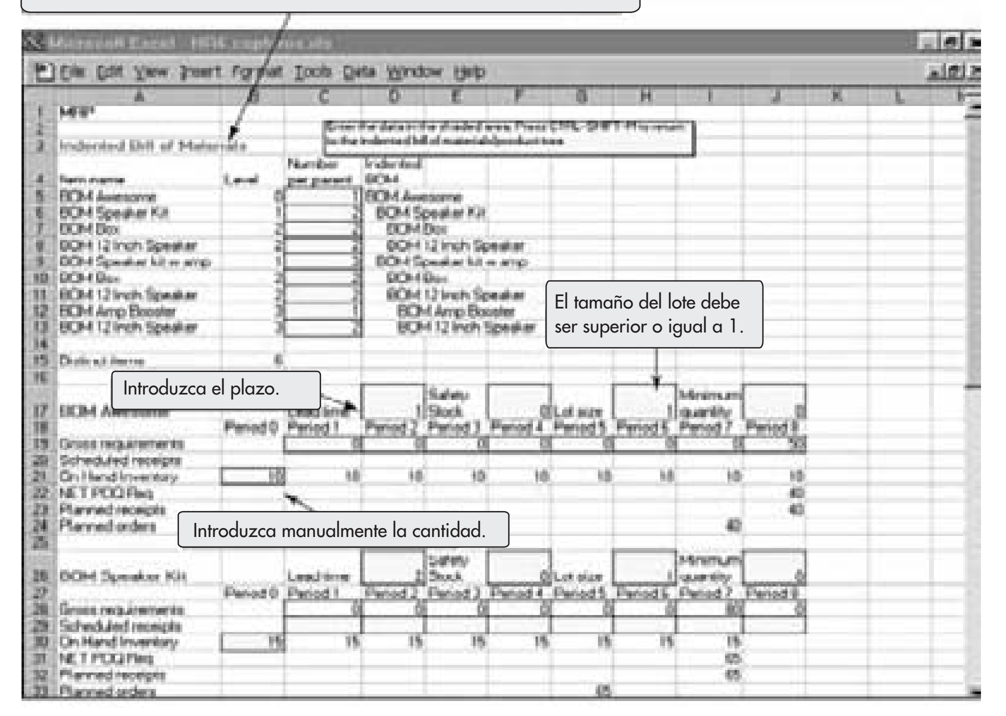
La tercera pantalla de Excel OM para MRP reproduce el dentado de la lista de materiales y proporciona la tabla de entrada estándar de MRP. Esto se muestra en el Programa 4.1 utilizando los datos de los Ejemplos 1, 2 y 3.

Cómo utilizar POM para Windows

El módulo de MRP del programa POM para Windows también puede resolver los Ejemplos del 1 al 3. Se pueden analizar hasta 18 periodos. A continuación se indican los inputs necesarios:

1. *El nombre de los artículos*. Los nombres de los artículos se introducen en la columna de la izquierda. El mismo nombre de artículo aparecerá en más de una fila si el artículo es utilizado por dos artículos padre. Cada artículo debe seguir a sus padres.
2. *Nivel del artículo.* Aquí debe darse el nivel del artículo dentro de la lista de materiales dentada. El artículo *debe* estar colocado a un nivel por debajo del nivel del artículo inmediatamente superior.
3. *Plazo.* Aquí se introduce el plazo. Por defecto será de una semana.
4. *Número de unidades por padre.* Aquí se introduce el número de unidades de este artículo necesarias para producir una unidad de su padre. Por defecto es 1.
5. *Disponible*. Registre el inventario actual disponible una vez, aun cuando en el artículo aparezca dos o más veces.
6. *Tamaño del lote*. El tamaño del lote se puede especificar aquí. Un 0 o 1 realizarán un pedido lote a lote. Si se introduce otro número, entonces todos los pedidos de ese artículo serán un múltiple entero de ese número.

PROGRAMA 4.1 ■ Utilización del módulo MRP de Excel OM para resolver los Ejemplos 1, 2 y 3



7. *Demandas*. Las demandas se introducen en la fila de los artículos acabados en el periodo en que se solicitan estos artículos.
8. *Recepciones programadas*. Si está programado que se reciban unidades de un artículo en el futuro, deberían registrarse en el periodo de tiempo adecuado (columna) y en el artículo (fila). (Una entrada en el nivel 0 es una demanda; en todos los demás niveles son recepciones).

Para más detalles *véase* POM para Windows en el Apéndice IV.

PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto 4.1

Determine la codificación de nivel inferior y la cantidad necesaria de cada componente para producir 10 unidades de un conjunto que llamaremos Alfa. La estructura del producto y las cantidades necesarias de cada componente para cada conjunto "padre" se indican entre paréntesis.

Solución

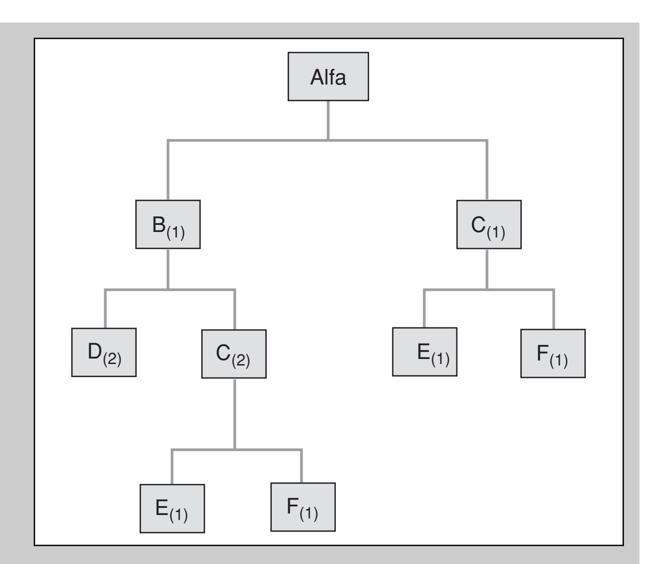
Vuelva a dibujar la estructura del producto con la codificación del nivel inferior. Multiplique entonces hacia abajo en la estructura (en vertical) hasta que determine las necesidades de cada rama. Después sume a lo largo de la estructura hasta que determine el total de cada uno.

Unidades del artículo "E" requeridas en la rama izquierda:

$$(1_{alfa} \times 1_B \times 2_C \times 1_E) = 2$$

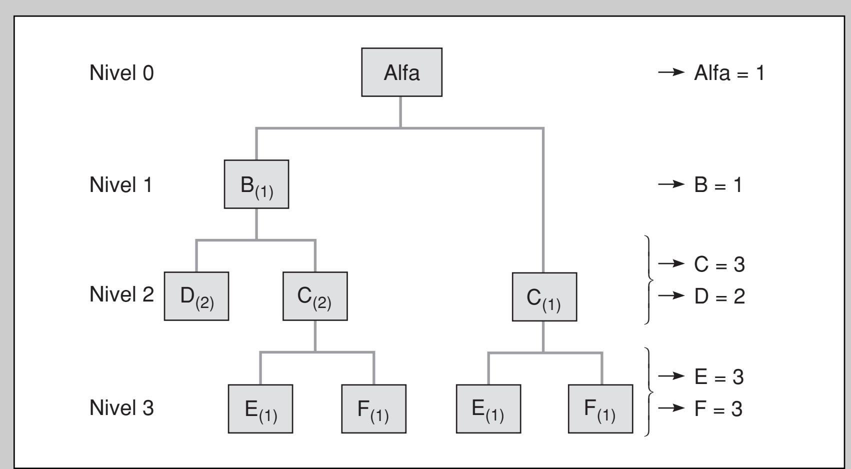
y unidades del artículo "E" requeridos en la rama derecha:

$(1_{alfa} \times 1_C \times 1_E) = \frac{1}{3}$ unidades de "E" requeridas en total



Entonces "explote" las necesidades multiplicando cada una por 10, como se muestra en la siguiente tabla:

Nivel	Artículo	Cantidad por unidad	Requisitos totales para 10 alfas
0	Alfa	1	10
1	B	1	10
2	C	3	30
2	D	2	20
3	E	3	30
3	F	3	30



Problema Resuelto 4.2

Utilizando la estructura de producto de Alfa del Problema Resuelto 4.1, y los plazos, el stock disponible y el programa maestro de producción que se muestran más abajo, prepare una tabla de MRP para los Alfas.

Artículo	Plazo	Cantidad por unidad
Alfa	1	10
B	2	20
C	3	0
D	1	100
E	1	10
F	1	50

Programa maestro de producción de Alfa

Periodo	6	7	8	9	10	11	12	13
Necesidades brutas			50			50		100

Solución

Véase la siguiente tabla.

Tamaño del lote	Plazo (n.º de periodos)	Disponible	Stock de seguridad	Reservado	Código de nivel inferior	Identificación del artículo			Período (semana, día) 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Lote a lote	1	10	—	—	0	Alfa (A)	Necesidades brutas									50			50		100
							Recepciones programadas														
							Disponible previsto	10								10					
							Necesidades netas									40			50		100
							Recepción de órdenes planificadas														
							Lanzamiento de órdenes planificadas								40			50		100	
Lote a lote	2	20	—	—	1	B	Necesidades brutas								40(A)			50(A)		100(A)	
							Recepciones programadas														
							Disponible previsto	20							20						
							Necesidades netas								20			50		100	
							Recepción de órdenes planificadas								20			50		100	
							Lanzamiento de órdenes planificadas						20			50		100			
Lote a lote	3	0	—	—	2	C	Necesidades brutas						40(B)		40(A)	100(B)		200(B) + 50(A)		100(A)	
							Recepciones programadas														
							Disponible previsto	0													
							Necesidades netas						40		40	100		250		100	
							Recepción de órdenes planificadas						40		40	100		250		100	
							Lanzamiento de órdenes planificadas			40		40	100		250		100				
Lote a lote	1	100	—	—	2	D	Necesidades brutas						40(B)			100(B)		200(B)			
							Recepciones programadas														
							Disponible previsto	100					100			60					
							Necesidades netas						0			40		200			
							Recepción de órdenes planificadas						0			40		200			
							Lanzamiento de órdenes planificadas					0			40		200				
Lote a lote	1	10	—	—	3	E	Necesidades brutas			40(C)		40(C)	100(C)		250(C)		100(C)				
							Recepciones programadas														
							Disponible previsto	10		10											
							Necesidades netas			30		40	100		250		100				
							Recepción de órdenes planificadas			30		40	100		250		100				
							Lanzamiento de órdenes planificadas		30		40	100		250		100					
Lote a lote	1	50	—	—	3	F	Necesidades brutas			40(C)		40(C)	100(C)		250(C)		100(C)				
							Recepciones programadas														
							Disponible previsto	50		50		10									
							Necesidades netas			0		30	100		250		100				
							Recepción de órdenes planificadas					30	100		250		100				
							Lanzamiento de órdenes planificadas				30	100		250		100					

Hoja de planificación de las necesidades netas de materiales de Alfa.

Nota: La letra entre paréntesis (A) indica el origen de donde procede la demanda.

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.

 En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Visita virtual a una empresa
- Problemas en Internet
- Casos de estudio en Internet

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Videoclip y caso de estudio en vídeo
- Ejercicio Active Model
- Excel OM
- Archivos de datos para ejemplos de Excel OM
- POM para Windows

CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. ¿Cuál es la diferencia entre un plan de necesidades *brutas* y un plan de necesidades *netas*?
2. Una vez que se ha creado un plan de necesidades de materiales (MRP), ¿qué otras aplicaciones de gestión podrían descubrirse para la técnica?
3. ¿Cuáles son las similitudes entre MRP y DRP?
4. ¿En qué se diferencia MRP de MRP II?
5. ¿Cuál es la mejor política de lotificación para las organizaciones manufactureras?
6. ¿Qué impacto tiene sobre el tamaño de los lotes ignorar el coste de transporte en la asignación de stock en un sistema DRP?
7. MRP es más que un sistema de gestión de inventarios. ¿Qué capacidades adicionales posee MRP?
8. ¿Cuáles son las opciones de un planificador de la producción que tiene (a) para la próxima semana una carga de trabajo programada superior a la capacidad de un centro de trabajo y (b) una continua falta de capacidad en ese centro de trabajo?
9. Los programas maestros se expresan de tres formas distintas en función de si el proceso es continuo, un taller o un proceso repetitivo. ¿Cuáles son estas tres formas?
10. ¿A qué funciones de la empresa afecta un sistema de MRP? ¿Cómo?
11. ¿Cuál es la razón de ser de (a) una lista de materiales fantasma, (b) una lista de planificación de materiales y (c) una pseudolista de materiales?
12. Identifique cinco necesidades específicas de un sistema de MRP eficaz.
13. ¿Cuáles son los beneficios típicos de un MRP?
14. ¿Cuáles son las diferencias entre MRP, DRP y ERP?
15. Como planteamiento para la gestión de inventarios, ¿en qué difiere MRP del enfoque adoptado en el Capítulo 2, en lo relativo a la cantidad económica de pedido (EOQ)?
16. ¿Qué inconvenientes tiene un ERP?
17. Utilice Internet, u otras fuentes, para:
  a) Encontrar historias que destaquen las ventajas de un sistema ERP.
  b) Encontrar historias que destaquen las dificultades de comprar e instalar un sistema ERP, o que hablen de sus fallos.
18. Utilice Internet u otras fuentes para averiguar qué es lo que incluye un proveedor de sistemas ERP (SAP, PeopleSoft/Oracle, American Software, etc.) en estos módulos de software:
  a) Gestión de las relaciones con el cliente.
  b) Gestión de la cadena de suministros.
  c) Gestión del ciclo de vida del producto.
19. La propia estructura de los sistemas MRP sugiere que los plazos de fabricación/aprovisionamiento son fijos. Sin embargo, muchas empresas se han pasado a las técnicas JIT y kanban. ¿Cuáles son las técnicas, problemas y efectos de incorporar las técnicas JIT de compras e inventarios a una organización que tiene un MRP?



DILEMA ÉTICO

Durante muchos meses un potencial comprador de su sistema de ERP ha estado analizando los cientos de supuestos que subyacen en su programa de ERP que vende por 800.000 dólares. Hasta ahora ha hecho todo lo posible para intentar cerrar la venta. Si consigue cerrarla, alcanzará su cuota anual y cobrará una buena prima. Por otra parte, si pierde esta venta ya puede empezar a buscar trabajo.

Los equipos de contabilidad, recursos humanos, cadena de suministros y marketing que ha creado el cliente han revisado las especificaciones y recomendado, finalmente, que se compre el programa. Sin embargo, a medida que los ayudaba en el proceso de evaluación, usted empezó a darse cuenta de que los procedimientos de compras de su posible cliente, mediante los que se realizan gran parte de las compras en cientos de sus tiendas regionales, no se ajustan bien a su software ERP. Como poco, la personalización requerirá un desembolso adicional de 250.000 dólares para la implementación y los costes de formación. Los equipos del cliente no son conscientes de este problema y usted sabe que no hay presupuestados 250.000 dólares más.

¿Qué haría?



EJERCICIO ACTIVE MODEL

Utilizamos el ejercicio Active Model 14.1 para demostrar los efectos de los tamaños de lote (múltiplo) y los tamaños de lote mínimo.

Preguntas

1. Suponga que hay que pedir el artículo B en múltiplos de doce. ¿Qué artículos se ven afectados por este cambio?
2. Suponga que la cantidad mínima para pedir del artículo C es de 200 unidades. ¿Qué artículos se ven afectados por este cambio?

ACIVE MODEL 14.1 ■ Un análisis del modelo MRP utilizado por Speaker Kits, Inc., en los Ejemplos 1 a 3

Order Releases

Reset Data | Questions

Master Production Schedule

	Week 1	2	3	4	5	6	7	8
Item A	0	0	0	0	0	0	0	50

Item Master File

	Lead time	On hand	Lot size multiple	Minimum lot size
A	1	10	1	0
B	2	15	1	0
C	1	20	1	0
D	1	10	1	0
E	2	10	1	0
F	3	5	1	0
G	2	0	1	0

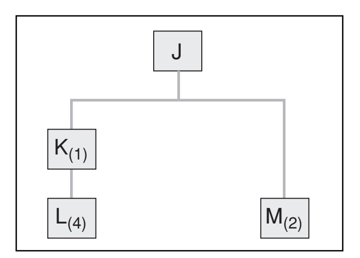
Planned Order Releases

	Week 1	2	3	4	5	6	7	8
A							40	
B					65			
C						100		
D		380		130				
E			120	200				
F			195					
G	195							



PROBLEMAS*

4.1. Ha creado la siguiente sencilla estructura de producto de los artículos necesarios para su bolsa de regalo para una fiesta de donativos en su organización. Prevé que habrá 200 asistentes. Suponga que no hay inventario disponible de ninguno de los artículos. Explote la lista de materiales (los subíndices muestran el número de unidades necesarias).



4.2. Se espera que tenga preparadas las bolsas de regalo del Problema 4.1 a las cinco de la tarde. Sin embargo, tiene que personalizar los artículos (bolígrafos con monograma, cuadernos y documentos personalizados). El plazo de montaje es de 1 hora para ensamblar 200 J cuando tenga preparados los artículos a incluir. Los otros artículos también requieren su tiempo. Dados los voluntarios a su disposición, las demás estimaciones de tiempos son 2 horas para el artículo K, 1 hora para el artículo L y 4 horas para el artículo M. Desarrolle un plan de ensamblaje situado en el tiempo para preparar las bolsas de regalo.

4.3. La demanda del submontaje S es de 100 unidades en la semana 7. Cada unidad de S necesita 1 unidad de T y 2 unidades de U. Cada unidad de T necesita 1 unidad de V, 2 unidades de W y 1 unidad de X. Finalmente cada unidad de U requiere 2 unidades de Y y 3 unidades de Z. Una empresa fabrica todos los artículos. Son necesarias 2 semanas para fabricar S, 1 semana para hacer T, 2 semanas para hacer U, 2 semanas para fabricar V, 3 semanas para fabricar W, 1 semana para fabricar X, 2 semanas para fabricar Y y 1 semana para fabricar Z.

a) Construya una estructura de producto. Identifique todos los niveles, padres y componentes.
b) Construya una estructura de producto situada en el tiempo.

4.4. Utilizando la información del Problema 4.3, construya un plan de necesidades brutas de materiales.

4.5. Utilizando la información del Problema 4.3, construya un plan de necesidades netas de materiales, utilizando el siguiente inventario disponible:

Artículo	Inventario disponible	Artículo	Inventario disponible
S	20	W	30
T	20	X	25
U	40	Y	240
V	30	Z	40

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; significa que se puede resolver el problema con Excel OM; significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

Tamaño del lote	Plazo de fabricación (n.º de periodos)	Disponible	Stock de seguridad	Reservado	Código de nivel inferior	Identificación del artículo		Periodo (semana, día)							
								1	2	3	4	5	6	7	8
							Necesidades brutas								
							Recepciones programadas								
							Disponible previsto								
							Necesidades netas								
							Recepciones de órdenes planificadas								
							Lanzamiento de órdenes planificadas								
							Necesidades brutas								
							Recepciones programadas								
							Disponible previsto								
							Necesidades netas								
							Recepciones de órdenes planificadas								
							Lanzamiento de órdenes planificadas								
							Necesidades brutas								
							Recepciones programadas								
							Disponible previsto								
							Necesidades netas								
							Recepciones de órdenes planificadas								
							Lanzamiento de órdenes planificadas								
							Necesidades brutas								
							Recepciones programadas								
							Disponible previsto								
							Necesidades netas								
							Recepciones de órdenes planificadas								
							Lanzamiento de órdenes planificadas								
							Necesidades brutas								
							Recepciones programadas								
							Disponible previsto								
							Necesidades netas								
							Recepciones de órdenes planificadas								
							Lanzamiento de órdenes planificadas								

FIGURA 4.13 ■ Formulario MRP para la resolución de los problemas del Capítulo 4

Para diferentes problemas de este capítulo, puede ser útil una copia del formulario de la Figura 4.13.

4.6. Volvamos de nuevo a los Problemas 4.3 y 4.4. Además de las 100 unidades de S, existe también una demanda de 20 unidades de U, que es un componente de S. Las 20 unidades de U se necesitan por motivos de mantenimiento. Estas unidades se necesitan en la semana 6. Modifique el *plan de necesidades brutas* para reflejar este cambio.

4.7. Refiriéndonos de nuevo a los problemas 4.3 y 4.5, además de las 100 unidades de S, existe también una demanda para 20 unidades de U, que es un componente de S. Las 20 unidades de U se necesitan por motivos de mantenimiento. Estas unidades se necesitan en la semana 6. Modifique el *plan de necesidades netas* para reflejar este cambio.

4.8. Como planificador de la producción de Adams-Ebert Products, Inc., se le ha dado la lista de materiales para un soporte compuesto de una base, dos muelles y cuatro abrazaderas. La base se ensambla a partir de una abrazadera y dos carcasas. Cada abrazadera tiene una

agarradera y una pieza metálica. Cada carcasa tiene dos cojinetes y un eje. No hay inventario disponible.

a) Diseñe la estructura del producto destacando las cantidades de cada artículo y mostrando la codificación de nivel inferior.
b) Calcule las cantidades brutas necesarias de cada artículo si monta 50 soportes.
c) Calcule las cantidades netas necesarias si hay un inventario disponible de 25 bases y 100 abrazaderas.

4.9. Su jefe en Adams-Ebert Products, Inc., le acaba de entregar el programa y los plazos de la abrazadera del problema anterior. La unidad debe estar preparada en la semana 10. Los plazos de montaje o aprovisionamiento para los distintos artículos son de 1 semana para el soporte, 1 semana para la base, 1 semana para los muelles, 1 semana para las abrazaderas, 2 semanas para las carcasas, 1 semana para las agarraderas, 3 semanas para las piezas metálicas, 1 semana para los cojinetes y 1 semana para los ejes.

a) Prepare la estructura del producto escalonada en el tiempo para el soporte.
b) ¿En qué semana debe lanzar las piezas metálicas?

4.10. **a)** Dada la estructura de producto y el programa maestro de producción de la Figura 4.14, desarrolle un plan de necesidades brutas para todos los artículos.
b) Dada la anterior estructura de producto, la programación maestra de la producción y la situación de inventario (Figura 4.14), desarrolle las necesidades netas de materiales (lanzamiento de órdenes planificadas) para todos los artículos.

4.11. Dada la siguiente estructura del producto, el programa maestro de producción y la situación de inventario (Figura 4.15), (a) desarrolle un plan de necesidades brutas del artículo C y (b) un plan de necesidades netas del artículo C.

4.12. A partir de los datos anteriores (*véase* la Figura 4.15), complete un plan de necesidades netas de materiales para todos los artículos (10 artículos en total).

4.13. La empresa Electro Ventiladores acaba de recibir un pedido de mil ventiladores de 20 pulgadas, a entregar en la semana 7. Cada ventilador consta de un conjunto carcasa, dos resistencias, un conjunto ventilador y una unidad eléctrica. El conjunto carcasa está constituido por un bastidor, dos soportes y un asa. El conjunto ventilador está constituido por un

Programa maestro de producción para X1

Periodo	7	8	9	10	11	12
Necesidades brutas		50		20		100

Artículo	Plazo	Disponible	Artículo	Plazo	Disponible
X1	1	50	C	1	0
B1	2	20	D	1	0
B2	2	20	E	3	10
A1	1	5			

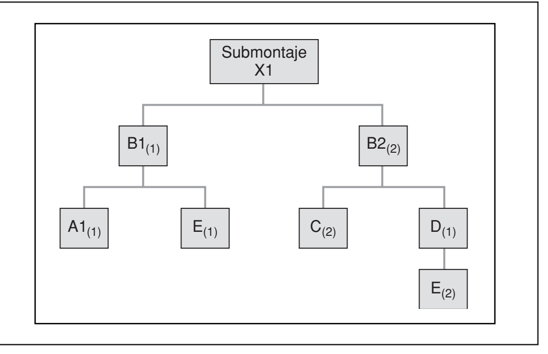


FIGURA 4.14 ■ Información para el Problema 4.10

Periodo	8	9	10	11	12
Necesidades brutas de A	100		50		150
Necesidades brutas de H		100		50	

Artículo	Disponible	Plazo	Artículo	Disponible	Plazo
A	0	1	F	75	2
B	100	2	G	75	1
C	50	2	H	0	1
D	50	1	J	100	2
E	75	2	K	100	2

FIGURA 4.15 ■ Información para los Problemas 4.11 y 4.12

eje y 5 palas. La unidad eléctrica está constituida por un motor, un interruptor y un pulsador. La siguiente tabla muestra los plazos de producción/aprovisionamiento, el inventario disponible y las recepciones programadas.

a) Construya una estructura de producto.
b) Construya una estructura del producto situada en el tiempo.
c) Prepare el plan de necesidades netas de materiales.

Datos del problema 4.13

Componente	Plazo	Inventario disponible	Tamaño del lote	Recepción programada
Ventilador de 20 pulgadas	1	100	—	
Carcasa	1	100	—	
Marco	2	—	—	
Soportes (2)	1	50	—	
Asa	1	400	—	
Resistencias (2)	2	200	—	
Montaje del ventilador	3	150	—	
Eje	1	—	—	
Palas (5)	2	—	100	
Unidad eléctrica	1	—	—	
Motor	1	—	—	
Interruptor	1	20	12	
Pulsador	1	—	25	200 pulsadores en la semana 2

ARTÍCULO	INVENTARIO DISPONIBLE
A	0
B	2
C	10
D	5
E	4
F	5
G	1
H	10

ÁRBOL DE LA ESTRUCTURA DE PRODUCTO

LT = Plazo en semanas
(1) = Todas las cantidades = 1

A LT = 1
B(1) LT = 1
F(1) LT = 1
C(1) LT = 2
D(1) LT = 1
G(1) LT = 3
H(1) LT = 1
E(1) LT = 1
E(1) LT = 1
C(1) LT = 2

FIGURA 4.16 ■ Información para los problemas 4.14, 4.15 y 4.16

4.14. En la Figura 4.16 se muestran la estructura de producto, los plazos (semanas) y las cantidades disponibles en inventario del producto A y sus componentes.

Partiendo de esta información, prepare:

a) Una lista de materiales dentada del producto A (*véase* la Figura 5.9 del Capítulo 5 del volumen *Decisiones Estratégicas* como ejemplo de una lista de materiales BOM).
b) Las necesidades netas de cada componente para producir 10 unidades de A en la semana 8, utilizando la política de lote a lote.

4.15. Es usted el planificador del producto A (Problema 4.14). El director del servicio postventa, Al Trostel, le acaba de comunicar que para poder atender las necesidades de las reparaciones postventa, las necesidades de B y F deberían incrementarse cada una en 10 unidades.

a) Prepare una lista que muestre las cantidades necesarias de cada componente para producir las unidades requeridas por el director de servicio postventa, además de la producción ya requerida de 10 unidades de A.
b) ¿Cuáles son las necesidades netas [la lista del punto a) menos el inventario disponible]?
c) Prepare un plan de necesidades netas por fecha para las nuevas necesidades (tanto de producción como de servicio postventa), suponiendo que el director del servicio postventa quiere sus 10 unidades de B y F en la semana 6, y las 10 unidades a producir de A en la semana 8.

4.16. Le acaban de notificar por fax que el plazo de entrega para el componente G del producto A (Problema 4.15) ha aumentado a 4 semanas.

a) ¿Qué artículos quedan afectados y por qué?
b) ¿Cuáles son las consecuencias para el plan de producción?
c) Como planificador de la producción, ¿qué puede hacer?

Tabla de datos para los Problemas 4.17 a 4.19

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Necesidades brutas	30		40		30	70	20		10	80		50

Coste de almacenamiento = 2,5 dólares/unidad/semana; coste de preparación = 150 dólares; plazo = 1 semana; inventario inicial = 40.

4.17. Desarrolle una solución con la política de lotificación lote a lote y calcule los costes totales relevantes con los datos de la tabla anterior.

4.18. Desarrolle una solución con la política de lotificación EOQ y calcule los costes totales relevantes. Los costes de rotura de stock ascienden a 10 dólares por unidad.

4.19. Desarrolle una solución con la política de lotificación PPB y calcule los costes totales relevantes.

4.20. Utilizando el plan de necesidades brutas de los Ejemplos 4, 5 y 6, prepare un sistema de órdenes alternativo que siempre ordene 100 unidades una semana antes de que se produzca una situación de rotura (una cantidad fija de orden de 100) con los mismos costes que en el ejemplo (coste de preparación de 100 dólares por pedido, coste de almacenamiento de un dólar por unidad por periodo). ¿Cuál es el coste de este sistema de órdenes?

4.21. Utilizando el plan de necesidades brutas de los Ejemplos 4, 5 y 6, prepare un sistema de órdenes alternativo que cada tres semanas ordene para las tres semanas siguientes (un sistema de periodo fijo). Utilice los mismos costes que en el ejemplo (coste de preparación de 100 dólares por pedido, coste de almacenamiento de un dólar por pedido por periodo). ¿Cuál es el coste de este sistema?

4.22. Utilizando el plan de necesidades brutas de los Ejemplos 4, 5 y 6, prepare un sistema de órdenes alternativo diseñado por usted mismo que utilice los mismos costes que en el ejemplo (coste de preparación de 100 dólares por pedido, coste de almacenamiento de un dólar por unidad por periodo). ¿Puede obtener un resultado mejor en costes que los anteriores? ¿Cuál es el coste de su sistema de pedidos?

4.23. Katherine Hepburn, Inc., ha recibido los siguientes pedidos:

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tamaño del pedido	0	40	30	40	10	70	40	10	30	60

Toda la fabricación de estas unidades se programa en una única máquina. Hay 2.250 minutos efectivos por semana, y cada unidad requiere 65 minutos para su fabricación. Desarrolle un plan de capacidad para un periodo de 10 semanas.

4.24. David Jurman, Ltd., ha recibido los siguientes pedidos:

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tamaño del pedido	60	30	10	40	70	10	40	30	40	0

Toda la fabricación de estas unidades se programa en una única máquina. Hay 2.250 minutos efectivos por semana, y cada unidad requiere 65 minutos para su fabricación. Desarrolle un plan de capacidad para un periodo de 10 semanas.

4.25. Como director de operaciones, ha puesto en marcha recientemente un sistema de planificación de las necesidades de distribución (DRP). La empresa tiene un almacén en la costa este y otro en la costa oeste, así como un almacén principal en la fábrica de Omaha, Nebraska. Acaba de recibir los pedidos de los directores de los tres almacenes para el

siguiente periodo de planificación. Sus informes se muestran en las siguientes tablas. El plazo de entrega para los almacenes de las costas este y oeste es de 2 semanas, y el plazo de entrega para el almacén de la fábrica es de 1 semana. Los envíos se realizarán mediante camiones que transportan 100 unidades. No hay inventario inicial en este sistema. La fábrica está teniendo problemas en el establecimiento de un plan de materiales estable, y todavía opera con tamaño de lote múltiplos de 100.

Datos del almacén de la costa este

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Previsión de necesidades Plazo de entrega = 2 semanas			40	100	80	70	20	25	70	80	30	50

Datos del almacén de la costa oeste

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previsión de necesidades Plazo de entrega = 2 semanas		20	45	60	70	40	80	70	80	55

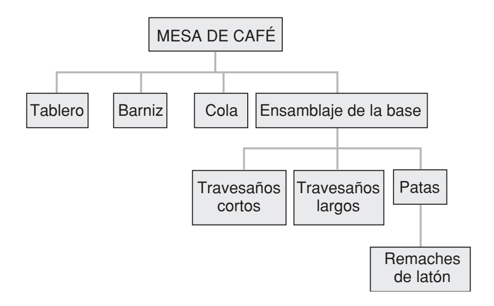
Datos del almacén de la fábrica

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Previsión de necesidades Plazo de entrega = 1 semana			30	40	10	70	40	10	30	60

a) Muestre el plan de recepción de pedidos desde la fábrica.

b) Si la fábrica necesitase dos semanas para producir la mercancía, ¿cuándo se han de emitir los pedidos a la fábrica?

4.26. Está planificando la producción de su popular *mesa de café rústica*. Para hacer una mesa necesita un tablero, cuatro patas, medio litro de barniz, un cuarto de litro de cola, dos travesaños cortos entre las patas y dos travesaños largos entre las patas, y un remate de latón que se coloca debajo de cada pata. Tiene 378 litros de cola en inventario, pero ningún otro componente. Todos los artículos, excepto los remates de latón, el barniz y la cola, se piden con un sistema de lote por lote. Los remates se adquieren en cantidades de 1.000 unidades y el barniz y la cola se compran por litros. El plazo de montaje/aprovisionamiento es de un día para cada artículo. Planifique los lanzamientos de órdenes necesarios para producir 640 mesas de café en los días 5 y 6, y 128 mesas en los días 7 y 8.



4.27. Utilizando los datos de la mesa de café del problema anterior, prepare una planificación de la mano de obra sabiendo que la necesidad de mano de obra por cada tablero es de

dos horas; cada pata, incluyendo la instalación del remache de latón, requiere un cuarto de hora, al igual que cada travesaño cruzado. El ensamblaje de la base requiere una hora de trabajo y el ensamblaje final requiere dos horas de trabajo. ¿Cuál es el número total de horas de mano de obra necesarias cada día, y cuántos empleados se necesitan cada día a ocho horas diarias por empleado?



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: 4.28 a 4.32.

■ *Caso de estudio* ■

El intento de Ikon con el ERP

Ikon Office Solutions es una de las empresas líderes del mundo en tecnología ofimática, con ingresos superiores a los 5.000 millones de dólares y actividades en Estados Unidos, Canadá, México, Reino Unido, Francia, Alemania y Dinamarca. Ikon está siguiendo una estrategia de crecimiento para pasar de lo que eran más de ochenta concesionarios de fotocopiadoras que operaban de modo individual a una empresa integrada con el doble de ese tamaño en los próximos cuatro años. Su objetivo es ofrecer soluciones tecnológicas totales para las oficinas que van desde fotocopiadoras, impresoras digitales, y servicios de gestión de documentación hasta la integración de los sistemas, formación y otros servicios de tecnología de redes. La empresa ha ampliado rápidamente su capacidad de servicio con un agresivo esfuerzo de adquisiciones que ha incluido la compra de empresas de servicios de tecnología y de gestión de documentos.

Dados todos estos objetivos, la empresa parecía necesitar un software de planificación de los recursos de la empresa (ERP). Hace unos años puso en marcha un proyecto piloto en el distrito de Northen California para valorar la posibilidad de utilizar en toda la empresa las aplicaciones de software de empresa de SAP. El responsable de sistemas de información, David Gadra, que se incorporó a la empresa Ikon al mes de iniciarse el sistema piloto, sin embargo, decidió no extenderlo. Ikon tendrá que aceptar unas pérdidas de 25 millones de dólares por el coste del programa piloto.

"Hubo una serie de factores que nos hicieron llegar a la conclusión de que este proyecto nos planteaba más problemas que ventajas –comenta Gadra–. Cuando tuvimos todo en cuenta (factores humanos, faltas de funcionalidad y costes asociados), llegamos a la conclusión de que nuestro entorno no se adecua bien al software de SAP". En su lugar, Ikon está implantando en sus 13 divisiones regionales un sistema informático desarrollado por la organización.

"No culpo a los consultores ni a SAP –comenta–. Por nuestra parte también cometimos nuestros propios errores en la estimación de la cantidad de cambios de negocio que deberíamos hacer como parte de esta implementación".

La mayor parte de la pérdida de 25 millones de dólares corresponde a honorarios de los consultores; menos del 10 por ciento fue para pagar el propio software. A lo largo del proyecto, Ikon estuvo pagando de 40 a 50 consultores externos a 300 dólares por hora.

Ikon presupuestó 12 millones de dólares para poner en marcha el sistema. Ese coste terminó siendo de más de 14 millones, incluyendo 8 millones de dólares pagados a IBM en concepto de consultoría.

Una de las principales razones por las que la empresa decidió dejarr SAP fue su conclusión de que el software no abordaba suficientemente las necesidades de una empresa de servicios como Ikon, que son distintas de las de las empresas manufactureras. Por ejemplo,

SAP no tenía una función adecuada para hacer un seguimiento de las solicitudes de servicio. Ikon también tenía una gran dificultad en crear un equipo interno de expertos de SAP. Los costes de Ikon eran elevados porque la empresa dependía en exceso de los consultores externos.

"Estoy muy decepcionado por el anuncio de Ikon", comenta el presidente de SAP America Jeremy Coote, describiendo el programa piloto de Ikon como acabado puntualmente y "de gran éxito". Coote describe la decisión de desechar el proyecto por parte de Ikon como "un ejemplo de lo que ocurre cuando uno no lo vende a nivel corporativo" además de a nivel de división. Una nueva versión de SAP incluirá un módulo de gestión de servicios.

Preguntas para debate

1. ¿Cuáles son las necesidades de información en Ikon y qué alternativas tiene para satisfacer estas necesidades?
2. ¿Cuáles son las ventajas e inconvenientes del software ERP para satisfacer estas necesidades?
3. ¿Qué riesgos asumió la empresa al elegir el software de SAP?
4. ¿Por qué canceló Ikon el proyecto SAP?

Fuentes: Adaptado de M. K. McGee, "Ikon Writes off $25M in Costs on SAP Project", *Information Week* (abril de 1997): 25; y J. R. Gordon y S. R. Gordon, *Information Systems: A Management Approach*, 2.ª edición (Fort Worth: Dryden Press, 1999): 182-183.



Caso de estudio en vídeo

MRP en Wheeled Coach

Wheeled Coach, el mayor fabricante de ambulancias del mundo, fabrica miles de configuraciones diferentes que cambian continuamente. La naturaleza de personalización de este negocio significa múltiples opciones y diseños especiales, y una potencial pesadilla de planificación e inventarios. Wheeled Coach (empresa filial de Collins Industries) afrontó estos problemas, y tuvo éxito en la resolución de muchos de ellos mediante un sistema de MRP (descrito en el *Perfil de una empresa global* que abre este Capítulo). Sin embargo, como en la mayoría de las instalaciones MRP, la resolución de un conjunto de problemas deja al descubierto otros nuevos.

Uno de los nuevos problemas que tuvo que resolver el director de la fábrica, Lyon Whalen, fue la aparición de un exceso de inventario. Los directivos descubrieron una cantidad sustancial de inventario disponible que no había sido montada en ningún producto acabado. Este exceso de inventario se había descubierto debido al nuevo nivel de exactitud requerido por el sistema MRP. La otra razón para el descubrimiento era una nueva serie de informes de inventario generada por el sistema MRP, MAPICS de IBM, utilizado por Wheeled Coach. Uno de esos informes indica dónde se utilizan los artículos y se conoce como informe de "dónde se utiliza". Curiosamente, muchos artículos de inventario no intervenían en las listas de materiales (BOM) de ningún producto actual. En algunos casos, la razón de por qué algunas partes estaban en almacén sigue siendo un misterio.

El descubrimiento de este exceso de inventario llevó a renovar los esfuerzos para asegurar que las listas de materiales eran precisas. Con un trabajo importante, la exactitud de los BOM aumentó y el número de notificaciones de cambios de ingeniería (*Engineering Change Notices, ECNs*) disminuyó. Análogamente, se mejoró la precisión de los pedidos de compra, especialmente en lo referente a la codificación de los artículos y a las cantidades pedidas. Además, aumentó la precisión del departamento de recepción y del almacén, ayudando todo ello a cumplir la planificación, los costes y, en última instancia, las fechas de expedición y la calidad.

Al final, Lynn Whalen concluyó que las cantidades residuales de exceso de inventario eran el resultado, al menos en parte, de los rápidos cambios en el diseño de las ambulancias y en la tecnología. Otro motivo provenía de los cambios efectuados por los clientes después de haberse establecido las especificaciones y una vez pedidos los materiales. Estos últimos excesos aparecían porque, aunque el tiempo de fabricación propio de Wheeled Coach

era de únicamente 17 días, muchos de los artículos que se compraban requerían mayores plazos de entrega.

Preguntas para el debate*

1. ¿Por qué es tan importante la exactitud del inventario en Wheeled Coach?
2. ¿Qué tipo de plan sugeriría para resolver los excesos de inventario en Wheeled Coach?
3. Sea explícito en sus sugerencias para la reducción del inventario y cómo las aplicaría.

* Puede que desee ver este caso en vídeo en su CD-ROM del alumno antes de responder a las preguntas.

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Visite nuestra página personal www.prenhall.com/heizer para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Auto Parts Inc.:** Este distribuidor de recambios del automóvil tiene importantes problemas de MRP.
- **Ruch Manufacturing:** Un fabricante de camiones quiere revisar su política de política de cálculo del tamaño de los lotes.

Harvard ha seleccionado estos casos de la Harvard Business School para acompañar este capítulo (textbookcasematch.hbsp.harvard.edu):

- **Digital Equipment Corp.: El modelo del punto final.** (#688-059): Implementación de un sistema MRP II para reducir el tiempo de ciclo de las órdenes.
- **Tektronix, Inc.: Implementación global de un sistema de ERP** (#699-043): La implementación en Tektronix de un sistema ERP en las tres divisiones de negocio globales.
- **Vardelay Industries, Inc.** (#697-037): Ilustra el ERP y los problemas relacionados sobre reingeniería de procesos, normalización y gestión del cambio.
- **Moore Medical Corp.** (#601-142): Analiza la inversión de Moore en un sistema ERP y sus inversiones en módulos adicionales.



BIBLIOGRAFÍA

Bolander, Steven F., y Sam G. Taylor. “Scheduling Techniques: A Comparison of Logic”. Production and Inventory Management Journal 41, n.º 1 (tercer trimestre 2000): pp. 1-5.

Davenport, Tom. *Mission Critical: Realizing the Promise of Enterprise Systems.* Boston: Harvard Business School Press, 2000.

Gattiker, Thomas F. “Anatomy of an ERP Implementation Gone Awry”. *Production and Inventory Management* 43, n.º 3-4 (tercer/cuarto trimestre 2002): pp. 96-105.

Kanet, J., y V. Sridharan. “The Value of Using Scheduling Information in Planning Material Requirements”. *Decision Sciences* 29, n.º 2 (primavera 1998): pp. 479-498.

Kapp, Karl M., Bill Latham, y Hester-Ford Latham. *Integrated Learning for ERP Success.* Boca Raton, FL: St. Lucie Press (2001).

Krupp, James A. G. “Integrating Kanban and MRP to Reduce Lead Time”. *Production and Inventory Management Journal* 43, n.º 3-4 (tercer/cuarto trimestre 2002): pp. 78-82.

Lawrence, Barry F., Daniel F. Jennings, y Brian E. Reynolds. *ERP in Distribution.* Florence, KY: Thomson South-Western, 2005.

Moncrief, Stephen. “Push and Pull”. *APICS–The Performance Advantage* (junio 2003): pp. 46-51.

Wacker, John G., y Malcolm Miller. “Configure-to-Order Planning Bills of Material: Simplifying a Complex Product Structure for Manufacturing Planning and Control”. *Production and Inventory Management Journal* 41, n.º 2 (segundo trimestre 2000): pp. 21-26.

Wagner, H. M., y T. M. Whitin. “Dynamic Version of the Economic Lot Size Model”. *Management Science* 5, n.º 1 (1958): pp. 89-96.



RECURSOS EN INTERNET

American Software:
www.amsoftware.com
APICS The Performance Advantage online edition:
www.apics.org/resources/magazine
Armstrong Management Group maintains a Web site with cases and articles related to ERP and MRP:
http://www.armstronglaing.com
Business Research in Information and Technology:
www.brint.com
CMS Software, Inc.:
www.cmssoftware.com
i2 Technologies:
www.i2.com
Intelligent Enterprise Software:
www.iqms.com
SAP America:
www.sap.com
SSA Global:
www.ssaglobal.com
Oracle:
www.oracle.com
PeopleSoft:
www.peoplesoft.com

PROGRAMACIÓN A CORTO PLAZO

5

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando haya completado este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Diagramas de Gantt
- Método de asignación
- Reglas para secuenciar
- La regla de Johnson
- Cuellos de botella

Describir o explicar:

- Programación
- Secuenciación
- Carga del taller
- Teoría de las restricciones



PERFIL DE UNA EMPRESA GLOBAL: DELTA AIRLINES

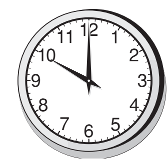
Programación de aviones cuando la meteorología es el enemigo

Para mejorar la reprogramación de los vuelos, los empleados de Delta Airlines controlan pantallas gigantes que muestran mapas meteorológicos, patrones climáticos y mapas de los vuelos de Delta, en su centro de control de operaciones de Atlanta.

Los directores de operaciones de las líneas aéreas aprenden a esperar lo inesperado. Acontecimientos que requieren una rápida reprogramación forman parte habitual de su vida. Durante las duras experiencias de los tornados, las tormentas de hielo y las tormentas de nieve, las compañías aéreas de todo el mundo deben luchar para hacer frente a retrasos, cancelaciones y pasajeros furiosos. Los cambios inevitables de la programación a menudo crean una onda expansiva que repercute sobre los pasajeros en una docena de aeropuertos de la red. En un año representativo se interrumpe cerca del 10 por ciento de los vuelos de Delta Airlines, la mitad a causa del mal tiempo; el coste es de 440 millones de dólares en ingresos perdidos, pago de horas extra y vales de alojamiento y comidas.

Ahora Delta está sacándose la espina de las pesadillas en la programación causadas por los problemas meteorológicos, con su recientemente inaugurado centro neurálgico de alta tecnología que costó 33 millones de dólares, junto al aeropuerto internacional Hartsfield-Jackson de Atlanta. Gracias a sus sistemas informáticos, de telecomunicaciones y de descongelación, el nuevo centro de control de operaciones de Delta notifica más rápidamente a los clientes de los cambios de horarios, desvía los vuelos y consigue que los aviones estén volando mucho antes. El trabajo del Centro de Control de Operaciones consiste en conseguir que el flujo de los vuelos tenga el menor número de problemas a pesar de los contratiempos.

4 a.m	1 a.m.	1.30 p.m	5 p.m.	10 p.m.
PRONÓSTICO: Lluvia con posibilidad de nieve ligera sobre Atlanta.	PRONÓSTICO: Lluvia helada después de las 17.00	PRONÓSTICO: La lluvia se está transformando en nieve.	PRONÓSTICO: Menos nieve de la esperada.	PRONÓSTICO: La nieve disminuye.
ACCIÓN: Estudiar la situación de los aviones y la necesidad de posibles cancelaciones.	ACCIÓN: Camiones descongelantes listos; realizar planes de cancelaciones de entre el 50 y el 80 % de los vuelos posteriores a las 6 p.m.	ACCIÓN: Cancelar la mitad de los vuelos entre las 6 p.m y las 10. p.m.; notificarlo a los pasajeros y desviar los aviones.	ACCIÓN: Seguir llamando a los pasajeros y organizar vuelos alternativos.	ACCIÓN: Encontrar hotel para los 1.600 pasajeros inmovilizados por la tormenta.




Aquí podemos ver lo que los empleados de Delta Airlines debían hacer un día cualquiera de diciembre, cuando una tormenta se cernía sobre Atlanta.

Con un acceso mucho más rápido a la información, las dieciocho personas del centro estudian minuciosamente gran cantidad de datos que continuamente transmiten los sistemas informáticos, y se adaptan rápidamente a los cambios. A partir de los modelos matemáticos de programación descritos en este capítulo, Delta determina los cambios de horarios y de rutas. Esto significa que se tienen que coordinar aviones que llegan y salen, asegurarse de que se dispone de las tripulaciones pertinentes, reprogramar las conexiones para coordinar los horarios de llegada, y asegurarse de que se transmite la información a los pasajeros lo antes posible.

El software de Delta, denominado Sistema de Re-reserva para el Pasajero Damnificado, avisa a los pasajeros de las cancelaciones y retrasos, e incluso les reserva plaza en compañías de la competencia si es necesario. Dado que todos los días hay 150.000 pasajeros que vuelan desde y hacia Atlanta, Delta piensa que sus nuevos esfuerzos de programación le ahorrarán 35 millones de dólares anuales.

IMPORTANCIA ESTRATÉGICA DE LA PROGRAMACIÓN A CORTO PLAZO

Delta Airlines no sólo programa sus más de 800 vuelos diarios, sino que también programa a más de 12.000 pilotos y auxiliares de vuelo para que atiendan a los pasajeros que desean ir a su destino. Esta programación, basada en programas informáticos muy complejos, desempeña un papel esencial para satisfacer a los clientes. La ventaja competitiva de Delta se encuentra en su flexibilidad para hacer modificaciones de última hora para la demanda y ante los trastornos causados por la meteorología.

Las empresas manufactureras también elaboran programas que ajustan la producción a las demandas de los clientes. La fábrica que tiene Lockheed-Martin en Dallas programa máquinas, herramientas y personas para fabricar piezas de aviones. El sistema informático central de Lockheed descarga los programas de producción de piezas en un sistema de fabricación flexible (FMS), en el que el director toma la decisión final de programación. Este sistema flexible de fabricación permite fabricar piezas de muchos tamaños y formas, en cualquier orden, sin interrumpir la producción. Esta versatilidad en la programación hace que las piezas estén listas en el tiempo previsto, con reducidos tiempos de preparación, poco trabajo en curso y una alta utilización de la maquinaria. Así, con una programación eficiente, empresas como Lockheed-Martin cumplen con las fechas prometidas a los clientes y hacen frente a una competencia basada en el tiempo.

La importancia estratégica de la programación es clara:

- Una programación eficaz significa un rápido movimiento de bienes y servicios en las instalaciones. Esto significa una mayor utilización de los activos y, por tanto, mayor capacidad por dólar invertido, lo que, a su vez, *reduce el coste*.
- Esta mayor capacidad, una producción más rápida y la flexibilidad citada suponen un mejor servicio al cliente a través de una *entrega más rápida*.
- Una buena programación también contribuye a adquirir con los clientes unos compromisos realistas y, en consecuencia, a una *entrega fiable*.

DIEZ DECISIONES ESTRATÉGICAS DE DIRECCIÓN DE OPERACIONES

Diseño de bienes y servicios
Gestión de la calidad
Estrategia de proceso
Estrategias de localización
Estrategias de layout
Recursos humanos
Dirección de la cadena de suministros
Gestión del inventario
Programación
Agregada
Corto plazo
Mantenimiento

CONCEPTOS DE PROGRAMACIÓN

La programación se ocupa de cuándo realizar de las operaciones. La Tabla 5.1 muestra los tipos de decisiones de programación en cinco organizaciones: un hospital, una universidad, una fábrica, un restaurante y una compañía aérea. Como se puede ver en la Figura 5.1, una secuencia de decisiones afectan a la programación. Las decisiones de programación comienzan con la planificación de la *capacidad*, que implica a *los recursos totales disponibles de equipos e instalaciones* (estudiada en el Capítulo 7 y su suplemento del volumen *Decisiones Estratégicas*). Los planes de capacidad son normalmente anuales o trimestrales en función de la compra o eliminación de nuevos equipos e instalaciones. En la fase de planificación agregada (Capítulo 3), se toman decisiones sobre la utilización de instalaciones, inventario, personas y contratistas externos. Normalmente los planes agregados son mensuales, y *se asignan los recursos en función de una medida agregada como unidades, toneladas o número de horas de taller totales*. Sin embargo, el programa maestro desagrega el plan agregado y desarrolla un *programa para productos específicos o líneas de producto concretas para cada semana*. A continuación los programas a corto plazo traducen las decisiones de capacidad, de planificación agregada (intermedia) y de programación maestra en secuencias de trabajo y en *asignaciones específicas de personas, materiales y máquinas*. En este capítulo se estudia el minucioso problema de la programación de bie-

TABLA 5.1 ■ Decisiones de programación

Organización	Los directivos deben programar lo siguiente:
Hospital Arnold Palmer	La utilización de los quirófanos La admisión de pacientes Personal médico, de enfermería, seguridad y mantenimiento Tratamientos de pacientes externos
Universidad de Missouri	Aulas y equipo audiovisual Horarios de estudiantes y profesores Cursos de posgrado y licenciatura
Fábrica de Lockheed-Martin	Producción de bienes Compras de materiales Trabajadores
Hard Rock Café	Chef, camareros, bármanes Entrega de alimentos frescos Espectáculos Apertura del restaurante
Delta Airlines	Mantenimiento de aviones Horarios de salida Tripulaciones de vuelo, personal de abastecimiento, de embarque y de billetes



Programación en Hard Rock Café

nes y servicios *a corto plazo* (es decir, el ajuste de las necesidades diarias u horarias al personal y equipos disponibles).

Programación hacia adelante (*forward*) y hacia atrás (*backward*)

La programación implica asignar fechas de entrega para trabajos concretos, pero muchos de estos trabajos compiten simultáneamente por los mismos recursos. Para ayudar a resolver las dificultades inherentes a la programación, podemos clasificar las técnicas de programación en (1) programación hacia adelante y (2) programación hacia atrás.

Programación hacia adelante (*forward*) Programación que comienza en cuanto se conocen los requerimientos.

Programación hacia atrás (*backward*) Programación que comienza en la fecha de entrega solicitada y programa en primer lugar la última operación, y las otras etapas del trabajo en orden inverso.

La **programación hacia adelante (*forward*)** se inicia tan pronto como se conocen los requerimientos del trabajo. Esta programación se utiliza en diversas organizaciones, como hospitales, clínicas, restaurantes y fábricas de máquinas herramienta. En estas instalaciones, los trabajos se realizan contra pedido de cliente, y normalmente se deben entregar lo antes posible. La programación hacia adelante se diseña habitualmente para elaborar un programa que pueda ser cumplido incluso si eso significa no satisfacer la fecha prevista de entrega. En muchos casos, la programación hacia adelante provoca un aumento del inventario de trabajo en curso.

La **programación hacia atrás (*backward*)** se inicia a partir de la fecha de entrega, programando primero la *última* operación a realizar en el trabajo. Las etapas del trabajo se programan entonces, de una en una, en orden inverso. Restando el plazo de producción de cada artículo, se obtiene la fecha de inicio. Sin embargo, puede que no haya recursos necesarios para cumplir el programa resultante. La programación hacia atrás se utiliza en

Planificación de la capacidad
(Largo plazo: años)
Cambios en las instalaciones
Cambios en los equipos
Véase el Capítulo 7 y el Suplemento 7 del volumen Decisiones Estrátegicas

Plan de la capacidad de nuevas instalaciones



Ajuste de la capacidad a la demanda sugerida por el plan estrátegico

Planificación agregada
(Plazo medio: trimestral o mensual)
Utilización de las instalaciones
Cambios de personal
Subcontratación
Véase el Capítulo 3

Plan de producción agregada de todas las bicicletas

Mes	1	2
Producción de bicicletas	800	850

Determinar el personal o la subcontratación necearia para igualar la demanda agregada a las instalaciones/capacidad actual

Programa maestro
(Plazo medio: semanal)
Planificación de las necesidades de materiales
Desagregación del plan agregado
Véanse los Capítulos 3 y 4

Programa mastro de producción para los modelos de bicicletas

	Mes 1				Mes 2			
Semana	1	2	3	4	5	6	7	8
Modelo 22		200		200		200		200
Modelo 24	100		100		150		100	
Modelo 26	100		100		100		100	

Determinar el programa de capacidad semanal

Programación a corto plazo
(Corto plazo: días, horas, minutos)
Carga del centro de trabajo
Secuencias de trabajos
Véase este capítulo

Trabajo asignado a empleados y centros de trabajo específicos

Ensamblar el modelo 22 en el centro de trabajo 6



Realizar el programa de capacidad finita asignando tareas específicas a empleados y máquinas específicos

FIGURA 5.1 ■ Relación entre la planificación de la capacidad, la planificación agregada, el programa maestro y la programación a corto plazo

La japonesa Nippon Steel mantiene sus operaciones de clase mundial automatizando la programación de personas, máquinas y herramientas a través de su centro de control acristalado y circular. El software de programación ayuda a los directivos a controlar la producción.

muchos entornos de fabricación, así como en entornos de servicios tales como preparar el servicio de un banquete o la programación de una operación quirúrgica. En la práctica, se emplea a menudo una combinación de la programación hacia adelante y hacia atrás, para hallar un equilibrio razonable entre lo que puede conseguirse y las fechas de entrega a los clientes.

Las averías de las máquinas, el absentismo laboral, los problemas de calidad, la falta de materiales y otros factores complican todavía más la programación (*véase* la tabla de *Dirección de producción en acción*, "No es fácil programar a trabajadores que se quedan dormidos en el trabajo"). Por consiguiente, la asignación de una fecha no asegura que el

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

NO ES FÁCIL PROGRAMAR A TRABAJADORES QUE SE QUEDAN DORMIDOS EN EL TRABAJO

Incapaz de hacer frente a un horario de trabajo que cambia constantemente, un operario de una gran refinería de petróleo se queda dormido en mitad de la noche, y sin darse cuenta vierte cientos de miles de litros de sustancias químicas en un río cercano.

Una historia similar se repite en el caso de los pilotos. Sus horarios inconstantes los obligan a menudo a echar una cabezada en la cabina de mando para dormir lo suficiente. "Ha habido ocasiones en que he tenido tanto sueño que me he quedado dormido mientras estaba rodando por la pista para tomar la posición de despegue –dice un piloto de Federal Express–. Me he quedado dormido leyendo las listas de control. Me he quedado dormido a mitad de una palabra".

En Estados Unidos, veinte millones de personas trabajan en sectores que tienen horarios de 24 horas. En entrevistas con investigadores, los empleados del turno de noche cuentan historias de haber visto a trabajadores de cadenas de montaje dormidos caerse de sus taburetes, lotes de piezas defectuosas pasar por delante de inspectores que estaban dormitando, y a agotados operadores de carretillas elevadoras, chocar contra las paredes. "Es algo demasiado inquietante. ¿Cómo puede admitirse que los operadores de una planta de energía nuclear se duerman habitualmente en el trabajo?", pregunta un investigador de Harvard.

La programación es un problema importante en empresas con turnos de noche. Algunas compañías, aunque ni mucho menos todas, están tomando medidas para resolver los problemas de sueño provocados por el horario de los trabajadores. Dow Chemical, Detroit Edison, Pennzoil y Exxon, por ejemplo, están dando a sus trabajadores varios días libres entre cambios de turno. El Departamento de Policía de Filadelfia está ahora utilizando pocos cambios de horarios y menos aleatorios, e informa que los accidentes de tráfico de los agentes que están de servicio han descendido en un 40 por ciento.

Cuanto más se conozca sobre el coste económico que suponen los constantes cambios de horario, las compañías comprenderán que no pueden seguir ignorando el problema. Como dice el docto. David Kupfer, "Está en juego un dineral, y algunas veces, incluso vidas humanas".

Fuentes: Newsweek (18 de octubre de 2004): 56; *Safety and Health* (enero de 2004): 14; y *Knight-Ridder Tribune News* (24 de agosto de 2003): 1.

trabajo será realizado según el programa. Se han desarrollado muchas técnicas especializadas para ayudar a preparar programas fiables.

Criterios de programación

La técnica correcta de programación depende del volumen de órdenes, de la naturaleza de las operaciones y de la complejidad general de los trabajos, así como de la importancia que se da a cada uno de los cuatro criterios siguientes:

1. *Minimizar el tiempo de finalización.* Este criterio se evalúa determinando el tiempo de finalización medio por trabajo.
2. *Maximizar la utilización.* Se evalúa determinando el porcentaje de tiempo en que se utiliza la instalación.
3. *Minimizar el inventario de trabajos en curso (WIP).* Se evalúa calculando el número medio de trabajos en el sistema. La relación entre el número de trabajos en el sistema y el inventario de trabajo en curso será elevada. Por lo tanto, cuanto más bajo sea el número de trabajos en el sistema, menor será el inventario.
4. *Minimizar el tiempo de espera de los clientes.* Se evalúa calculando el número medio de días de retraso.

En este capítulo se utilizan estos cuatro criterios, como se hace en la industria, para evaluar la eficacia de la programación. Además, los buenos métodos de programación deben

TABLA 5.2 ■ Diferentes procesos sugieren distintos enfoques de programación

- **Instalaciones enfocadas a proceso (talleres)** La programación se centra en definir un programa hacia adelante que se logra inicialmente con las fechas de finalización del MRP y se refina con las técnicas de programación a capacidad finita que se analizan en este capítulo. Estas instalaciones incluyen la mayor parte de la producción mundial. Entre los ejemplos cabe señalar las fundiciones, talleres mecánicos, ebanisterías, imprentas, muchos restaurantes y la industria de la moda.
- **Células de trabajo (instalaciones enfocadas que procesan familias de componentes similares)** La programación se centra en generar un programa hacia adelante. MRP genera las fechas de finalización, y la posterior programación/secuenciación detallada se realiza en la celda de trabajo con reglas de prioridades y *kanban*. Ejemplos son las células de trabajo en el fabricante de ambulancias Wheeled Coach, el reconstructor de motores de avión Standard Aero y el fabricante de tarjetas de felicitación Hallmark.
- **Instalaciones de producción repetitiva (cadenas de montaje)** La programación se centra en definir un programa hacia adelante que se consigue equilibrando la cadena con las técnicas tradicionales de equilibrado de cadenas de montaje, presentadas en el Capítulo 9 del volumen *Decisiones Estratégicas*. Las técnicas de arrastrar (*pull*), como JIT y *kanban* (analizadas en el Capítulo 6), indican la programación de componentes para proveer a la cadena de montaje. Las instalaciones de producción repetitiva incluyen cadenas de montaje de una amplia variedad de productos, desde automóviles hasta electrodomésticos y computadoras. Estos problemas de programación constituyen un reto, pero habitualmente sólo se presentan cuando el proceso es nuevo o cuando cambian los productos o modelos.
- **Instalaciones enfocadas a producto (continuas)** Estas instalaciones producen elevadas cantidades de una variedad limitada de productos, como papel en enormes máquinas en International Paper, cerveza en una planta de Anheuser-Busch, o los rollos de acero en una fábrica de Nucor. La programación genera un programa hacia adelante que puede satisfacer una demanda razonablemente estable con la capacidad fija existente. La capacidad en estas instalaciones suele estar limitada por la inversión de capital a largo plazo. Normalmente se conoce la capacidad de la instalación, así como el tiempo de preparación y de proceso de la limitada gama de productos. Esto hace que la programación sea relativamente fácil.

ser simples, claros, fáciles de comprender, fáciles de llevar a cabo, flexibles y realistas. Dadas estas consideraciones, *el objetivo de la programación es optimizar la utilización de los recursos de forma que se cumplan los objetivos de producción.*

La Tabla 15.2 muestra una visión general de diferentes procesos y enfoques para su programación.

A continuación analizamos la programación en instalaciones enfocadas a proceso, en instalaciones de producción repetitiva y en el sector servicios.

PROGRAMACIÓN DE INSTALACIONES ENFOCADAS A PROCESO

Las instalaciones enfocadas a proceso (también conocidas como *instalaciones intermitentes* o *talleres —job-shop facilities—*)[1] son sistemas de gran variedad y bajo volumen,

[1] La mayoría de los libros de programación se centran en las manufacturas; por tanto, se utiliza con frecuencia la expresión tradicional programación del taller (*job-shop scheduling*).

como se puede ver en la Tabla 5.2, que se encuentran comúnmente en organizaciones manufactureras y de servicios. Son sistemas de producción en los cuales los productos se hacen bajo pedido. Los artículos realizados mediante este sistema habitualmente difieren de forma considerable en cuanto a materiales utilizados, orden y requisitos del proceso, tiempo del mismo, y las necesidades de preparación. Debido a estas diferencias, la programación puede ser compleja. Para hacer funcionar una instalación de forma eficaz y equilibrada, el director necesita un sistema de planificación y control de la producción. Este sistema debería:

1. Programar las órdenes que se reciben sin violar las restricciones de capacidad de cada centro de trabajo individual.
2. Comprobar la disponibilidad de herramientas y materiales antes de lanzar una orden a un departamento.
3. Fijar fechas de finalización para cada trabajo, y controlar su progreso respecto a las fechas de necesidad y a los plazos de fabricación de las órdenes.
4. Controlar el trabajo en curso a medida que los trabajos avanzan por el taller.
5. Proporcionar información (*feedback*) sobre las actividades de planta y la producción.
6. Proporcionar estadísticas de eficiencia del trabajo y controlar los tiempos de los operarios a efectos de remuneración y del análisis de la distribución de la mano de obra.

Independientemente de que el sistema de programación sea manual o automático, debe ser preciso y adecuado. Esto significa que necesita una base de datos de producción con archivos de planificación y control[2]. He aquí tres tipos de **archivos de planificación**:

Archivos de planificación
El archivo maestro de artículos, el archivo de rutas y el archivo de centros de trabajo en un sistema de planificación de las necesidades de materiales.

1. Un *archivo maestro de artículos*, con información sobre cada componente que la empresa fabrica o compra.
2. Un *archivo de rutas*, que indica el flujo de cada componente en el centro de trabajo.
3. Un *archivo maestro del centro de trabajo*, que contiene información sobre el centro de trabajo, como su capacidad y eficiencia.

Archivos de control
Archivos que siguen el progreso real de una orden de trabajo respecto al plan.

Los **archivos de control** siguen el progreso real de una orden respecto al plan.

CARGA DE TRABAJOS

Carga de trabajo
Asignación de tareas a centros de trabajo o de proceso.

Por **carga de trabajos** se entiende la asignación de tareas a centros de trabajo o de proceso. Los directores de operaciones asignan trabajos a los centros de trabajo de tal forma que los costes, los tiempos muertos y los tiempos de realización se mantengan al mínimo. La carga de los centros de trabajo presenta dos formas[3]. Una está orientada a la capacidad y la otra está relacionada con la asignación de trabajos específicos a los centros de trabajo.

Primero, analizamos la carga desde la perspectiva de capacidad mediante una técnica conocida como control input-output. A continuación, se presentan dos formas de realizar

[2] Para un estudio más extenso *véase APICS Study Aid—Detailed Scheduling and Planning* (Alexandria, VA: American Production and Inventory Control Society).

[3] Obsérvese que este análisis se puede aplicar a centros de trabajo que podrían denominarse “taller” en una empresa manufacturera, “sala” en un hospital, o “departamento” en una oficina o en una gran cocina.

la carga de trabajos: los *diagramas de Gantt* y el *método de asignación* de la programación lineal.

Control input-output

Muchas empresas tienen problemas de programación (es decir, problemas para alcanzar una producción eficaz) porque sobrecargan los procesos de producción. A menudo, esto sucede porque se desconoce el rendimiento real de los centros de trabajo. Una programación eficaz debe igualar lo programado con lo ejecutado. El no conocer la capacidad y el rendimiento del centro provoca una reducción de la producción.

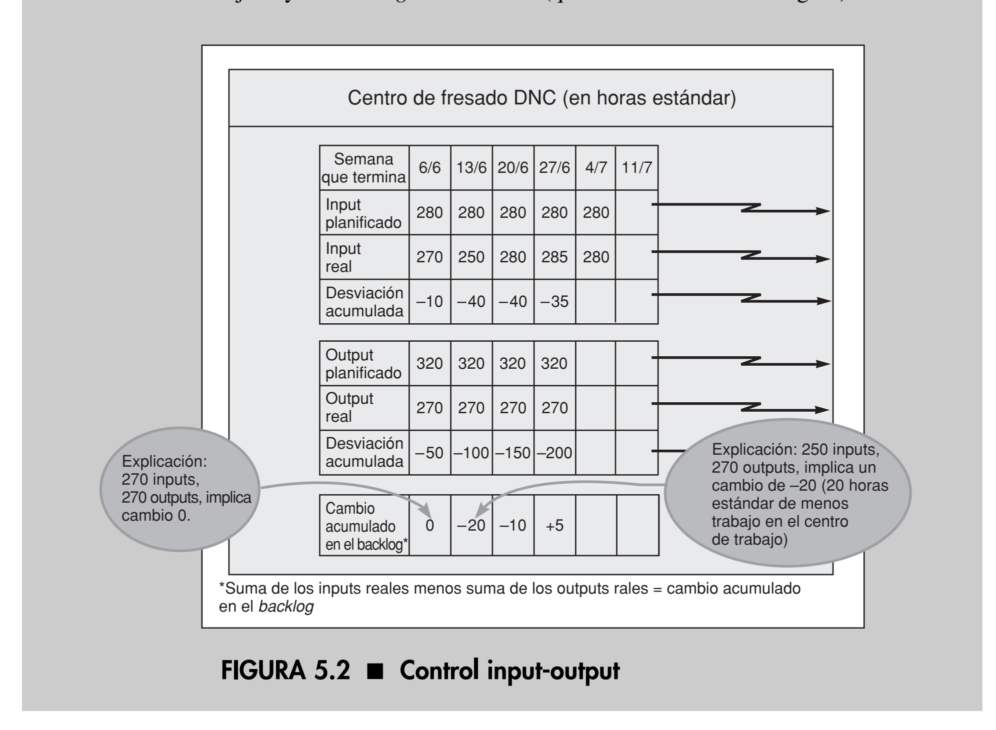
El **control input-output** es una técnica que permite al personal de operaciones gestionar los flujos de trabajo en la instalación. Si el trabajo llega más rápido de lo que se procesa, se está sobrecargando la instalación, y se produce un *backlog* (órdenes recibidas pero no servidas). La sobrecarga provoca una acumulación de órdenes en la instalación, lo que comporta ineficiencia y problemas de calidad. Si el trabajo está llegando a un ritmo inferior al que se están ejecutando los trabajos se está infracargando la instalación, y el centro de trabajo puede llegar a quedarse sin trabajo. La infracarga de la instalación da lugar a capacidad ociosa y a un desperdicio de recursos. El Ejemplo 1 muestra la utilización de los controles input-output.

Control input-output
Sistema que permite que el personal de operaciones gestione los flujos de trabajo en una instalación, mediante el control del trabajo añadido a un centro de trabajo y su trabajo terminado.

EJEMPLO 1

Control input-output

La Figura 5.2 muestra la capacidad planificada del centro de trabajo de fresado DNC (Control numérico Directo, *Direct Numerical Control*) para 5 semanas (semanas del 6/6 al 4/7). El input planificado es de 280 horas estándar por semana. El input real se aproxima a esa cifra, variando entre 250 y 285. El output está programado en 320 horas estándar, que es la capacidad supuesta. En el centro de trabajo hay un *backlog* de 300 horas (que no se muestra en la figura). Sin embar-



Semana que termina	6/6	13/6	20/6	27/6	4/7	11/7
Input planificado	280	280	280	280	280	
Input real	270	250	280	285	280	
Desviación acumulada	–10	–40	–40	–35		
Output planificado	320	320	320	320		
Output real	270	270	270	270		
Desviación acumulada	–50	–100	–150	–200		
Cambio acumulado en el backlog*	0	–20	–10	+5		

FIGURA 5.2 ■ Control input-output

go, el output real (270 horas) es bastante menor que lo planificado. Por tanto, no se están logrando ni el input ni el output planificados. De hecho, el *backlog* de trabajo (trabajo aceptado y no realizado) en este centro ha aumentado realmente en 5 horas en la semana 27/6. Esto aumenta el inventario de trabajos en curso, lo que complica la tarea de programación e indica que la dirección debe tomar cartas en el asunto.

Tarjetas ConWIP
Control de la cantidad de trabajo en un centro de trabajo, respaldando al control input-output.

El control input-output puede hacerse con un sistema de **tarjetas ConWIP**, que controlan la cantidad de trabajo que hay en un centro de trabajo. ConWIP son las siglas de ***con****stant* ***w****ork*-***i****n*-***p****rocess* (trabajos en curso constantes). La tarjeta ConWIP va con el trabajo (o lote) en su recorrido por el centro de trabajo. Cuando se termina el trabajo, se retira la tarjeta y se devuelve a la estación de trabajo inicial, autorizando la entrada de un nuevo lote en el centro de trabajo. La tarjeta ConWIP limita eficazmente la cantidad de trabajo que hay en el centro de trabajo, controla los plazos de producción y también el *backlog* (número de trabajos aceptados pero no realizados).

Las opciones disponibles para que el personal de operaciones gestione el flujo de trabajo en la instalación son:

1. Corregir el rendimiento.
2. Aumentar la capacidad.
3. Aumentar o reducir el input del centro de trabajo: (a) enviando trabajo a o desde otros centros de trabajo, (b) aumentando o disminuyendo la subcontratación, (c) produciendo menos (o produciendo más).

Producir menos no es una solución frecuente, pero sus ventajas pueden ser importantes. Primero, el nivel de servicio al cliente puede mejorar, porque las unidades pueden ser producidas en plazo. Segundo, la eficiencia puede mejorar, debido a que hay menos trabajo en curso que abarrota y desorganiza el centro de trabajo y aumenta los costes generales. Tercero, la calidad puede mejorar, porque el menor trabajo en curso oculta menos problemas.

Diagramas de Gantt

Diagramas de Gantt
Diagramas de planificación empleados para programar recursos y asignar tiempo.

Los **diagramas de Gantt** son ayudas visuales útiles para el control de la carga y la programación. Su nombre proviene de Henry Gantt, que desarrolló el concepto a finales del siglo XIX. Estos diagramas muestran cómo se utilizan los recursos, como los centros de trabajo y la mano de obra.

Cuando se utilizan en la *carga*, los diagramas de Gantt muestran el tiempo de carga y el tiempo muerto o inactivo de los distintos departamentos, máquinas o instalaciones. Muestran las cargas de trabajo relativas en el sistema, de tal forma que el director sabe qué ajustes son apropiados. Por ejemplo, cuando existe una sobrecarga en un centro de trabajo se pueden transferir temporalmente empleados de otro centro de trabajo con poca carga para aumentar así el personal del primero. O si hay trabajos en espera que se pueden procesar en diversos centros, algunos trabajos de los centros muy cargados se pueden transferir a otros con menos carga. También puede transferirse equipo flexible entre centros de trabajo. El Ejemplo 2 representa un sencillo diagrama de carga de Gantt.

El *diagrama de carga* de Gantt tiene una importante limitación: no tiene en cuenta la variabilidad de la producción, tal como averías inesperadas o errores humanos que requieran una adaptación del trabajo. Consiguientemente, el diagrama debe actualizarse periódicamente para tener en cuenta los nuevos trabajos y revisar las estimaciones de tiempo.

EJEMPLO 2

Diagrama de carga de Gantt

Un fabricante de lavadoras de Nueva Orleans acepta pedidos especiales de lavadoras que serán utilizadas en instalaciones singulares, como submarinos, hospitales y grandes lavanderías industriales. La producción de cada lavadora requiere tareas y duraciones diferentes. La Figura 5.3 muestra el diagrama de carga para la semana del 8 de marzo.

Los cuatro centros de trabajo procesan diferentes trabajos durante la semana. Este diagrama en particular indica que los centros de trabajo en metales y de pintura se encuentran totalmente cargados durante toda la semana. Los centros de mecánica y de electrónica tienen algunos tiempos de paro esparcidos durante la semana. También se observa que el centro de trabajo en metales no está disponible el martes, y el de pintura no está disponible el jueves, debido quizás al mantenimiento preventivo.

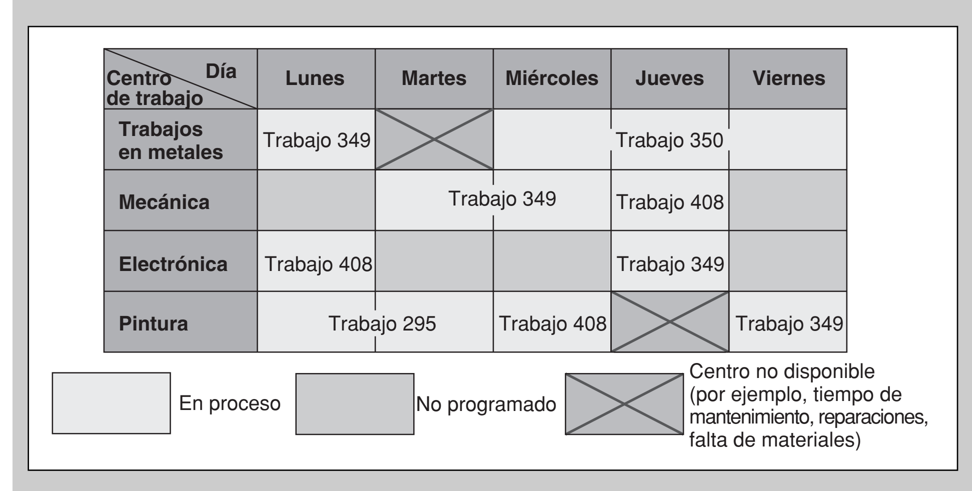


FIGURA 5.3 ■ Diagrama de carga de Gantt para la semana del 8 de marzo

Un *diagrama de programación* de Gantt se utiliza para realizar el seguimiento de los trabajos en curso[4]. Indica los trabajos que cumplen el programa y los que están adelantados o atrasados respecto a lo programado. En la práctica, existen muchas versiones del diagrama. El diagrama de programación del Ejemplo 3 sitúa los trabajos en curso en el eje vertical y el tiempo en el eje horizontal.

EJEMPLO 3

Diagrama de programación de Gantt

First Printing & Copy Center, en Winter Park, Florida, utiliza el diagrama de Gantt de la Figura 5.4 para visualizar la programación de tres órdenes, los trabajos A, B y C. Cada par de corchetes, en el eje del tiempo, representa la estimación del principio y fin del trabajo encerrado entre ellos. Las barras continuas de color reflejan el estado real o de progreso del trabajo. El trabajo A, por ejemplo, tiene un retraso de medio día con respecto al programa, al final del día 5. El trabajo B se completó después del mantenimiento del equipo. El trabajo C está por delante de lo programado.

[4] Los diagramas de Gantt también se utilizan en la programación de proyectos y se vieron en el Capítulo 3 del volumen *Decisiones Estratégicas,* "Dirección de proyectos".

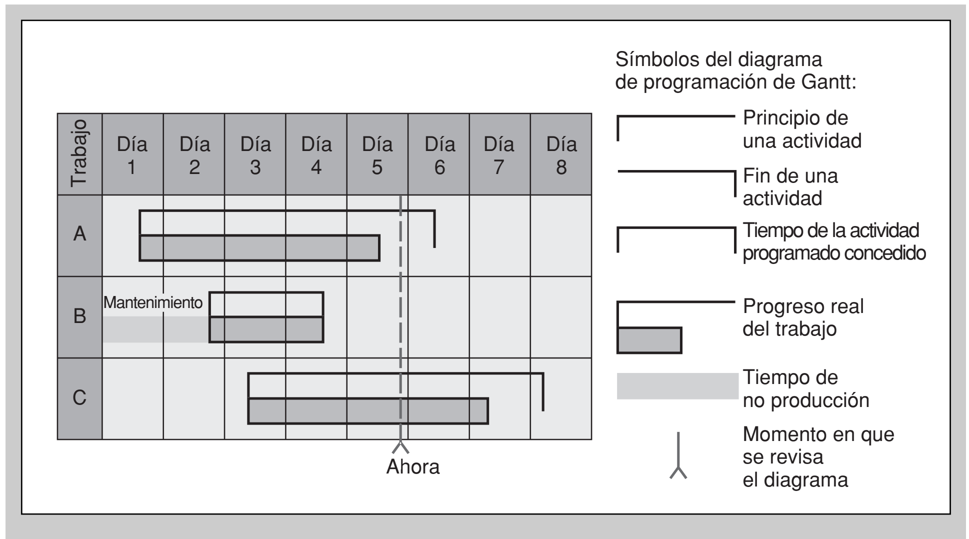


FIGURA 5.4 ■ Diagrama de programación de Gantt para los trabajos A, B y C de una imprenta

Método de asignación

Método de asignación
Tipo especial de modelo de programación lineal que implica asignar tareas o trabajos a los recursos.

El **método de asignación** implica asignar tareas o trabajos a los recursos. Los ejemplos pueden ser: asignar tareas a las máquinas, contratos a los postores, personas a los proyectos y vendedores a las zonas. El objetivo más común es minimizar los costes totales o el tiempo necesario para desarrollar las tareas a realizar. Una característica importante de los problemas de asignación es que se asigna sólo un trabajo (o trabajador) a una máquina (o proyecto).

Cada problema de asignación utiliza una tabla. Las cifras de la tabla son los tiempos o costes asociados a cada asignación concreta. Por ejemplo, si la imprenta First Printing & Copy Center dispone de tres cajistas (A, B y C) y tres nuevos trabajos para realizar, la tabla podría ser como la que se muestra a continuación. Los valores en dólares representan lo que la empresa estima que costaría cada trabajo de ser realizado por cada uno de los cajistas.

	Cajista		
Trabajo	**A**	**B**	**C**
R-34	11$	14$	6$
S-66	8$	10$	11$
T-50	9$	12$	7$

El método de asignación implica sumar y restar los números adecuados en la tabla, para encontrar el menor *coste de oportunidad*[5] de cada asignación. Se deben seguir cuatro pasos:

1. Restar el número menor de cada fila a cada número de esa fila y después, en la matriz resultante, restar el número más pequeño de cada columna a cada número

[5] Los costes de oportunidad son aquellos beneficios a los que se renuncia o que no se obtienen.

de esa columna. Este paso tiene el efecto de reducir los números de la tabla hasta que aparezca una serie de ceros, que significan *costes de oportunidad cero*. Aunque los números cambian, este problema reducido es equivalente al problema original, y la solución óptima será la misma.

2. Dibujar el menor número de líneas rectas horizontales y verticales necesarias para cubrir todos los ceros de la tabla. Si el número de líneas es igual al número de filas o de columnas de la tabla, entonces se puede hacer una asignación óptima (*véase* el paso 4). Si el número de líneas es menor que el número de filas o columnas, se continúa con el paso 3.

3. Restar el menor número no cubierto por una línea a cada número que esté descubierto. Sumar este mismo número a cada número o números que se encuentre(n) en la intersección de dos líneas. No cambia el valor de los números cubiertos sólo por una línea. Regresar al paso 2 y continuar hasta que sea posible una asignación óptima.

4. Las asignaciones óptimas estarán siempre en las casillas de la tabla que contienen un cero. Una manera sistemática de hacer una asignación válida es seleccionar en primer lugar una fila o columna que contenga sólo una casilla con cero. Se puede hacer una asignación a dicha casilla y después dibujar líneas horizontales y verticales que pasen a través de esta casilla. De las filas y columnas descubiertas, se elige otra fila o columna en la cual exista únicamente una casilla con cero. Se establece dicha asignación y se continúa el procedimiento mencionado, hasta que se haya asignado cada persona o máquina a una tarea.

El Ejemplo 4 muestra cómo se aplica el método de asignación.

EJEMPLO 4

Método de asignación

A continuación se repite la tabla de costes mostrada anteriormente. Siguiendo los pasos 1 a 4 se halla el mínimo coste total de asignación de trabajos a cajistas.

TRABAJO \ CAJISTA	A	B	C
R-34	11$	14$	6$
S-66	8$	10$	11$
T-50	9$	12$	7$



Paso 1a: Utilizando la tabla anterior, se resta el menor número de cada fila a cada número de esa fila. El resultado se muestra debajo (a la izquierda).

TRABAJO \ CAJISTA	A	B	C
R-34	5	8	0
S-66	0	2	3
T-50	2	5	0

TRABAJO \ CAJISTA	A	B	C
R-34	5	6	0
S-66	0	0	3
T-50	2	3	0

Paso 1b: Utilizando la tabla de arriba a la izquierda, se resta el menor número de cada columna a cada número de esa columna. El resultado se muestra arriba (a la derecha).

Paso 2: Se dibuja el número mínimo de líneas rectas necesarias para cubrir todos los ceros. Como bastan dos líneas, la solución no es óptima.

TRABAJO / CAJISTA	A	B	C
R-34	5	6	0
S-66	0	0	3
T-50	2	3	0

Menor número sin cubrir

Paso 3: Se resta el menor número sin cubrir (2 en esta tabla) de todos los números sin cubrir, y se suma a los números que se encuentran en la intersección de dos rectas.

TRABAJO / CAJISTA	A	B	C
R-34	3	4	0
S-66	0	0	5
T-50	0	1	0

Regresar al paso 2. Cubrir de nuevo los ceros con líneas rectas.

TRABAJO / CAJISTA	A	B	C
R-34	3	4	0
S-66	0	0	5
T-50	0	1	0

Como se necesitan tres líneas se puede establecer una asignación óptima (*véase* el paso 4). Se asigna el trabajo R-34 a la persona C, el S-66 a la persona B, y el T-50 a la persona B. Observando la tabla de costes original, vemos que:

Coste mínimo = 6$ + 10$ + 9$ = 25$

Nota: Si se hubiera asignado S-66 al componedor A, no se podría asignar T-50 a una casilla con cero.

El problema de programación de los equipos de árbitros de la Liga americana de béisbol entre una jornada y la siguiente es complicado por las muchas restricciones de los viajes, que van desde los cambios de hora de costa a costa, hasta los horarios de vuelos, y los juegos nocturnos que comienzan tarde. La Liga se esfuerza por alcanzar estos dos objetivos en conflicto: (1) equilibrar las asignaciones de los equipos de árbitros de forma relativamente equitativa entre todos los equipos durante la temporada, y (2) minimizar los costes de viaje. Utilizando la formulación del problema de asignación se ha reducido significativamente el tiempo que se tarda en diseñar un programa, y se ha mejorado su calidad.

Algunos problemas de asignación conllevan *maximizar* el beneficio, la eficacia, o los resultados de una asignación de tareas a personas, o de trabajos a máquinas. Es fácil obtener un problema equivalente de minimización, convirtiendo cada número de la tabla en una

pérdida de oportunidad. Para convertir un problema de maximización en uno equivalente de minimización se resta cada número de la tabla de beneficios al mayor número de esa tabla. Luego aplicamos los pasos 1-4 del método de asignación. Ocurre que la minimización de la pérdida de oportunidad produce la misma solución de asignación que el problema de maximización original.

SECUENCIACIÓN DE TRABAJOS

La *programación* ofrece un punto de partida para asignar trabajos a los centros correspondientes. La *carga* es una técnica de control de la capacidad que señala tanto las sobrecargas como las infracargas. La **secuenciación** (también conocida como despacho de trabajos o *dispatching*) determina el orden de realización de los trabajos en cada centro. Por ejemplo, suponga que han sido asignados 10 pacientes a una clínica para recibir tratamiento. ¿En qué orden deben ser tratados? ¿Se debe dar prioridad al primer paciente que llegó o a aquel que necesita un tratamiento de urgencia? Los métodos de secuenciación proporcionan esta información. Estos métodos se conocen como reglas de prioridad para secuenciar o despachar los trabajos en los centros de trabajo.

Secuenciación
Especificación del orden en que hay que realizar los trabajos en cada centro de trabajo.

Reglas de prioridad para secuenciar trabajos

Las **reglas de prioridad** proporcionan pautas para establecer la secuencia en que se deben realizar los trabajos. Las reglas son especialmente aplicables a las instalaciones orientadas a proceso, como clínicas, imprentas y talleres manufactureros. Analizaremos algunas de las reglas de prioridad más conocidas. Las reglas de prioridad intentan minimizar el tiempo de finalización de los trabajos, el número de trabajos en el sistema y el retraso de los trabajos, al mismo tiempo que se maximiza la utilización de la instalación.

Las reglas de prioridad más comunes son:

- **Primero en llegar, primero en atender (*First come, first served,* FCFS).** El primer trabajo en llegar al centro se procesa primero.
- **Tiempo de proceso más corto (*Shortest Processing Time,* SPT).** Los trabajos de duración más corta se realizan y terminan primero.
- **Fecha de entrega más temprana (*Earliest Due Date,* EDD).** Se elige en primer lugar el trabajo cuya fecha de entrega sea la más temprana.
- **Tiempo de proceso más largo (*Longest Processing Time,* LPT).** Los trabajos más largos son a menudo muy importantes y se eligen primero.

El Ejemplo 5 compara estas reglas.

Reglas de prioridad
Reglas que se emplean para determinar la secuencia de los trabajos en instalaciones orientadas a proceso.

Primero en llegar, primero en atender (FCFS)
Los trabajos se realizan en el orden de llegada.

Tiempo de proceso más corto (SPT)
Los trabajos con tiempos de proceso más cortos se asignan primero.

Fecha de entrega más temprana (EDD)
El trabajo con fecha de entrega más temprana se realiza antes.

Tiempo de proceso más largo (LPT)
Los trabajos con tiempos de proceso más largos se realizan antes.

EJEMPLO 5

Reglas de prioridad para despachar los trabajos

Hay cinco trabajos de diseño arquitectónico pendientes de ser asignados en el despacho de arquitectos Ajax, Tarney & Barnes Architects. En la siguiente tabla se muestran los tiempos de realización (proceso) y las fechas de entrega solicitadas. Queremos determinar la secuencia de proceso con arreglo a las reglas (1) FCFS, (2) SPT, (3) EDD y (4) LPT. A cada trabajo se le asignó una letra según el orden de llegada.

Trabajo	Tiempo de realización (proceso) del trabajo (días)	Fecha de entrega del trabajo (días)
A	6	8
B	2	6
C	8	18
D	3	15
E	9	23

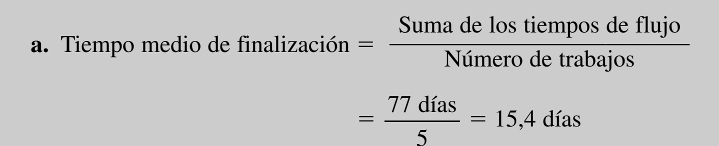
1. La secuencia FCFS que se muestra en la siguiente tabla es simplemente A-B-C-D. El "tiempo de flujo" en el sistema, para esta secuencia, mide el tiempo que espera cada trabajo más su tiempo de proceso. Por ejemplo, el trabajo B espera seis días mientras se está procesando el A, y luego tiene él mismo dos días más de operación; así que será completado en ocho días, dos días más tarde que su fecha de entrega solicitada.



El Ejemplo 5 se ilustra aún más en el ejercicio Active Model 15.1 del CD-ROM y en un ejercicio al final del capítulo.

Secuencia de trabajos	Tiempo de realización del trabajo (proceso)	Tiempo de flujo	Fecha de entrega solicitada	Retraso del trabajo
A	6	6	8	0
B	2	8	6	2
C	8	16	18	0
D	3	19	15	4
E	9	28	23	5
	28	77		11

La regla del primero en llegar, primero en servir (FCFS) da como resultado las siguientes medidas de eficacia:



a. $\text{Tiempo medio de finalización} = \dfrac{\text{Suma de los tiempos de flujo}}{\text{Número de trabajos}}$

$$= \frac{77 \text{ días}}{5} = 15{,}4 \text{ días}$$

b. $\text{Utilización} = \dfrac{\text{Tiempo de trabajo total (proceso)}}{\text{Suma de los tiempos de flujo}}$

$$= \frac{28}{77} = 36{,}4\%$$

c. $\text{Número medio de trabajos en el sistema} = \dfrac{\text{Suma de los tiempos de flujo}}{\text{Tiempo de trabajo total (proceso)}}$

$$= \frac{77 \text{ días}}{28 \text{ días}} = 2{,}75 \text{ trabajos}$$

d. $\text{Retraso medio del trabajo} = \dfrac{\text{Total días de retraso}}{\text{Número de trabajos}} = \dfrac{11}{5} = 2{,}2 \text{ días}$



2. La regla del SPT que se muestra en la siguiente tabla da como resultado la secuencia B-D-A-C-E. Las órdenes se secuencian según el tiempo de proceso, dando la mayor prioridad al trabajo de menor duración.

Secuencia de trabajos	Tiempo de realización del trabajo (proceso)	Tiempo de flujo	Fecha de entrega solicitada	Retraso del trabajo
B	2	2	6	0
D	3	5	15	0
A	6	11	8	3
C	8	19	18	1
E	9	28	23	5
	28	65		9

Las medidas de eficacia del SPT son:

a. Tiempo medio de finalización $= \frac{65}{5} = 13$ días

b. Utilización $= \frac{28}{65} = 43{,}1\%$

c. Número medio de trabajos en el sistema $= \frac{65}{28} = 2{,}32$ trabajos

d. Retraso medio de los trabajos $= \frac{9}{5} = 1{,}8$ días

3. La regla de EDD que se muestra en la siguiente tabla da como resultado la secuencia B-A-D-C-E. Observe que los trabajos quedan ordenados según la fechas de entrega más temprana.

Secuencia de trabajos	Tiempo de realización del trabajo (proceso)	Tiempo de flujo	Fecha de entrega solicitada	Retraso del trabajo
B	2	2	6	0
A	6	8	8	0
D	3	11	15	0
C	8	19	18	1
E	9	28	23	5
	28	68		6

Las medidas de eficacia de la EDD son:

a. Tiempo medio de finalización $= \frac{68}{5} = 13{,}6$ días

b. Utilización $= \frac{28}{68} = 41{,}2\%$

c. Número medio de trabajos en el sistema $= \frac{68}{28} = 2{,}43$ trabajos

d. Retraso medio de los trabajos $= \frac{6}{5} = 1{,}2$ días

4. La regla del LPT que se muestra en la siguiente tabla da como resultado la secuencia E-C-A-D-B.

Secuencia de trabajos	Tiempo de realización del trabajo (proceso)	Tiempo de flujo	Fecha de entrega solicitada	Retraso del trabajo
E	9	9	23	0
C	8	17	18	0
A	6	23	8	15
D	3	26	15	11
B	2	28	6	22
	28	103		48

Las medidas de eficacia del LPT son:

a. Tiempo medio de finalización $= \frac{103}{5} = 20{,}6$ días

b. Utilización $= \frac{28}{103} = 27{,}2\%$

c. Número medio de trabajos en el sistema $= \frac{103}{28} = 3{,}68$ trabajos

d. Retraso medio de los trabajos $= \frac{48}{5} = 9{,}6$ días

Los resultados de estas cuatro reglas se resumen en la siguiente tabla:

Regla	Tiempo medio de finalización (días)	Utilización (%)	Número medio de trabajos en el sistema	Retraso medio (días)
FCFS	15,4	36,4	2,75	2,2
SPT	13,0	43,1	2,32	1,8
EDD	13,6	41,2	2,43	1,2
LPT	20,6	27,2	3,68	9,6

Su médico puede utilizar la regla de prioridad de primero en llegar primero en atender *de modo satisfactorio. Sin embargo, dicha regla puede no ser tan buena en una sala de urgencias. ¿Qué regla de prioridad puede ser la mejor, y por qué? ¿Qué regla de prioridad se utiliza habitualmente en las series televisivas M*A*S*H y Urgencias?*

Como se puede observar en el Ejemplo 5, la regla LPT ofrece las peores medidas de eficacia en la secuenciación para Ajax, Tarney & Barnes Architects. El método SPT parece mejor en tres medidas, y la técnica EDD en la cuarta (retraso medio). Esto también se cumple en la realidad: ninguna regla de secuenciación es siempre la mejor en todos los criterios. La experiencia indica que:

Los resultados de una regla de secuenciación (despacho) cambian dependiendo de lo ocupada que esté la instalación.

1. La regla del menor tiempo de proceso (SPT) es generalmente la mejor técnica para minimizar el flujo de trabajo y para minimizar el número medio de trabajos en el sistema. Su mayor desventaja es que los trabajos de larga duración son continuamente relegados y la prioridad favorece a los de corta duración. Los clientes pueden no ver esto con buenos ojos, y deben hacerse ajustes periódicos para que puedan llevarse a cabo los trabajos más largos.
2. La regla del primero en llegar, primero en despachar (FCFS) no da buenos resultados en la mayor parte de los casos (aunque tampoco son especialmente malos) y tiene la ventaja, sin embargo, de parecer justa a los clientes, lo que resulta importante en los sistemas de servicios.
3. La fecha de entrega más temprana minimiza el retraso máximo, lo que puede ser necesario en el caso de trabajos que tienen una fuerte penalización pasada determinada fecha. Por lo general, la EDD funciona bien si los retrasos constituyen un problema.

Índice crítico (IC)

Índice crítico (IC)
Regla de secuenciación que consiste en un índice que se calcula dividiendo el tiempo que falta hasta la fecha de entrega solicitada, entre el tiempo de trabajo restante.

Otro tipo de regla para determinar la secuencia de los trabajos es la del índice crítico. El **índice crítico (*critical ratio,* CR)** en un número índice que se calcula dividiendo el tiempo que falta hasta la fecha de entrega solicitada por el tiempo de trabajo que queda por hacer. Al contrario que las reglas de prioridad, el índice crítico es dinámico y fácil de actualizar. Tiende a dar mejores resultados que la FCFS, el SPT, la EDD y el LPT en el criterio del retraso medio de los trabajos.

El índice crítico da prioridad a los trabajos que deben realizarse para mantener el programa al día. Un trabajo con un bajo índice crítico (menos de 1,0) lleva retraso con respec-

to al programa. Si el IC es exactamente 1,0, el trabajo marcha según lo programado. Un IC mayor que 1,0 significa que el trabajo va por delante del programa y tiene cierta holgura.

La fórmula del índice crítico es:

$$IC = \frac{\text{Tiempo que queda para entregar}}{\text{Días de trabajo restantes}} = \frac{\text{Fecha de entrega solicitada} - \text{Fecha actual}}{\text{Tiempo de trabajo restante (plazo de producción)}}$$

El Ejemplo 6 muestra cómo se aplica el índice crítico.

EJEMPLO 6

Índice crítico

Hoy es día 25 en el programa de producción de los Laboratorios de Pruebas Médicas Zyco. Se deben realizar tres trabajos, como se indica a continuación:

Trabajo	Fecha de entrega solicitada	Días de trabajo restantes
A	30	4
B	28	5
C	27	2

Calculamos los índices críticos, utilizando la fórmula del IC.

Trabajo	Índice crítico	Orden de prioridad
A	(30 − 25)/4 = 1,25	3
B	(28 − 25)/5 = 0,60	1
C	(27 − 25)/2 = 1,00	2

El trabajo B tiene un índice crítico menor que 1, lo que significa que se retrasará a menos que se acelere su proceso. Por ello, tiene la máxima prioridad. El trabajo C va en plazo, y el A goza de cierto margen de tiempo. Una vez esté completado el trabajo B, recalcularíamos los índices críticos para A y C, para determinar si las prioridades han cambiado.

En la mayoría de los sistemas de programación de la producción, la regla del índice crítico puede ayudar a conseguir lo siguiente:

1. Determinar la situación de un trabajo concreto.
2. Establecer una prioridad relativa entre los trabajos bajo un mismo criterio.
3. Relacionar los trabajos contra stock y los contra pedido bajo un mismo criterio.
4. Ajustar las prioridades (y revisar los programas) de forma automática para cambios tanto en la demanda como en el progreso de los trabajos.
5. Realizar un seguimiento dinámico del progreso de los trabajos.

Secuenciación de *N* trabajos en dos máquinas: regla de Johnson

El siguiente paso en complejidad es el caso en el que *N* trabajos (donde *N* es 2 o más) deben pasar a través de dos máquinas o centros de trabajo en el mismo orden. A esto se lo denomina problema *N*/2.

Regla (Algoritmo) de Johnson
Método que minimiza el tiempo de proceso resultante de secuenciar un grupo de trabajos a través de dos instalaciones, a la vez que se minimiza el tiempo inactivo total en los centros de trabajo.

Se puede utilizar la **regla de Johnson** para determinar la secuencia de paso de un grupo de trabajos a través de dos centros de trabajo minimizando el tiempo total de proceso[6]. También minimiza el tiempo muerto total en las máquinas. La *regla de Johnson* tiene cuatro pasos:

1. Se debe hacer una lista de todos los trabajos, mostrando el tiempo de proceso que requiere cada uno en cada máquina.
2. Se selecciona el trabajo con menor tiempo de proceso. Si el menor tiempo corresponde a la primera máquina, el trabajo se programa el primero. Si el menor tiempo corresponde a la segunda máquina, el trabajo se programa el último. Los empates en los tiempos de actividad se pueden romper de forma arbitraria.
3. Una vez que el trabajo está programado se elimina de la lista.
4. Se aplican los pasos 2 y 3 a los trabajos restantes, colocando los trabajos hacia el centro de la secuencia.

El Ejemplo 7 muestra cómo se aplica la regla de Johnson.

EJEMPLO 7

La regla de Johnson

En un taller de herramientas y moldes en Fredonia, Nueva York, se deben procesar cinco trabajos determinados a través de dos centros de trabajo (taladrado y torneado). El tiempo para procesar cada trabajo se muestra a continuación:

Tiempo de realización (proceso) para los trabajos (en horas)

Trabajo	Centro de trabajo 1 (taladro)	Centro de trabajo 2 (torneado)
A	5	2
B	3	6
C	8	4
D	10	7
E	7	12

1. Se desea establecer la secuencia que minimizará el tiempo total de proceso de los cinco trabajos. El trabajo con el tiempo de proceso más corto es A, en el centro de trabajo 2 (con un tiempo de 2 horas). Como está en el segundo centro, A se programa el último. Se elimina de la lista.

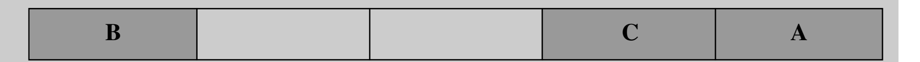
				A

2. El trabajo B tiene el siguiente tiempo más corto (3 horas). Como está en el primer centro de trabajo, se programa el primero y se elimina.

B				**A**

3. El siguiente tiempo más corto corresponde al trabajo C (4 horas) en la segunda máquina. Por lo tanto, se coloca lo más tarde posible, el penúltimo.

[6] S. M. Johnson, "Optimal Two and Three Stage Production Schedules with Set-Up Times Included", *Naval Research Logistics Quaterly* 1, n.º 1 (marzo de 1954): pp. 61-68.



B			**C**	**A**

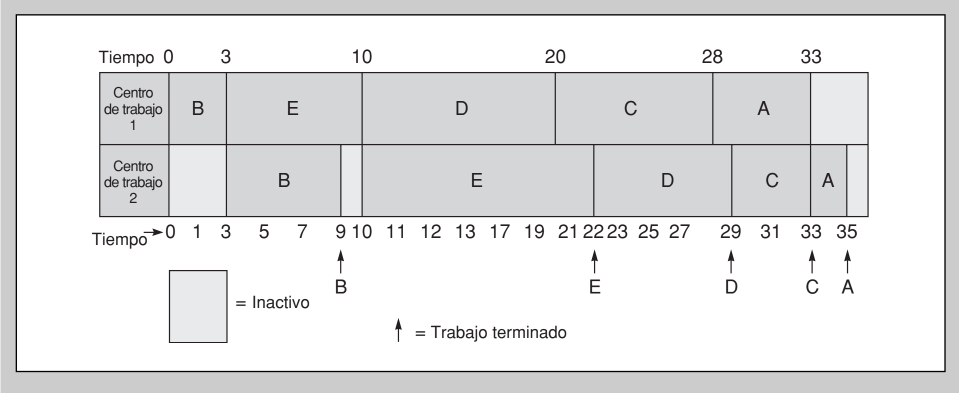
4. Existe un empate (de 7 horas) para el trabajo más corto entre los restantes. Se puede colocar primero el trabajo E, que estaba en el primer centro de trabajo, en la segunda posición de la secuencia. A continuación, se coloca D en la última posición que queda en la secuencia, la antepenúltima.

B	**E**	**D**	**C**	**A**

Los tiempos de proceso en la secuencia son:

Centro de trabajo 1	3	7	10	8	5
Centro de trabajo 2	6	12	7	4	2

El flujo situado en el tiempo de esta secuencia de trabajos se muestra mejor gráficamente:



Así, los cinco trabajos se terminan en 35 horas. El segundo centro de trabajo tendrá que esperar 3 horas a su primer trabajo y también tendrá que esperar 1 hora después de acabar el trabajo B.

Limitaciones de los sistemas de secuenciación basados en reglas

Las técnicas de programación estudiadas son técnicas basadas en reglas, pero los sistemas basados en reglas tienen diferentes limitaciones. Entre ellas están las siguientes:

La programación puede ser difícil de realizar, y aun así seguir dando malos resultados: no parece una combinación muy fructífera. Incluso con reglas sofisticadas, resulta difícil programar bien.

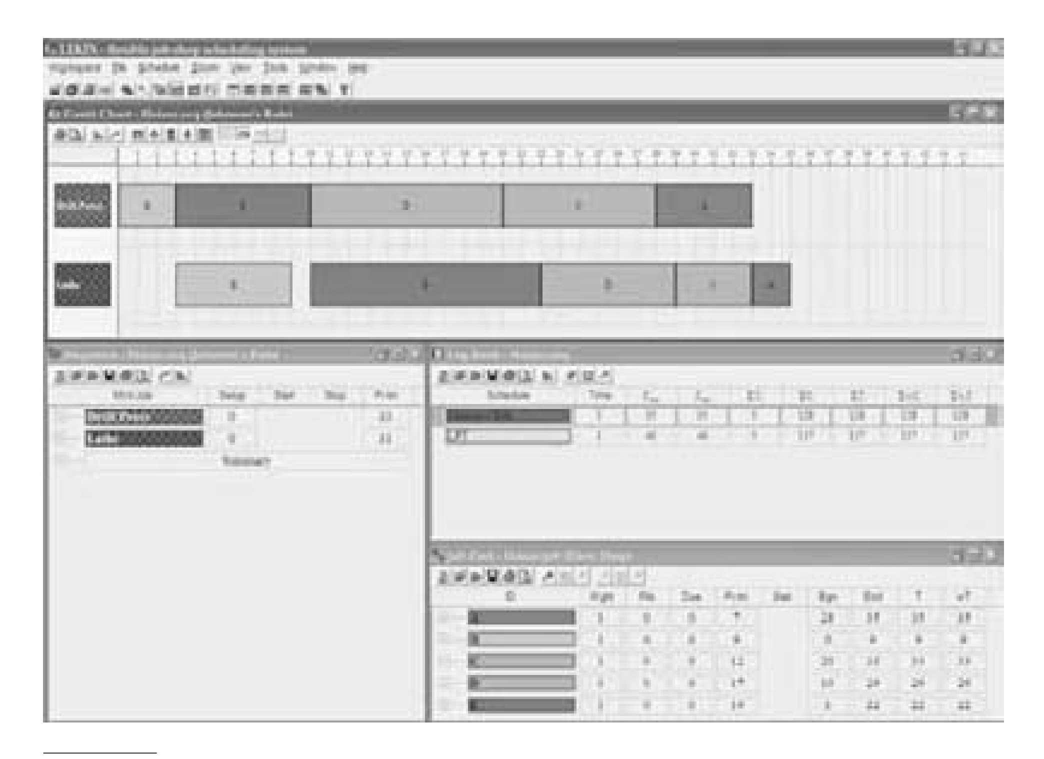
1. La programación es dinámica; por lo tanto, es necesario revisar las reglas para ajustarse a los cambios en las órdenes, en el proceso, en el equipo, en la combinación de productos, etcétera.
2. Las reglas no tiene en cuenta lo que ocurre antes o después en el proceso de producción; puede que no se tengan en cuenta recursos ociosos y cuellos de botella en otros departamentos.
3. Las reglas no analizan más allá de las fechas de entrega solicitadas. Por ejemplo: dos órdenes pueden tener la misma fecha de entrega; una orden sirve para reabastecer a un distribuidor y la otra corresponde a un pedido de un cliente que paralizará su fábrica si no se entrega a tiempo. Ambas tienen la misma fecha de entrega, pero el pedido del cliente es claramente más importante.

A pesar de estas limitaciones, los programadores utilizan normalmente reglas como la SPT, la EDD o el índice crítico para determinar las secuencias de los trabajos. Aplican estos métodos en cada centro de trabajo y después modifican la secuencia para tener en cuenta la multitud de variables del mundo real. Pueden hacer esto manualmente o con software de programación a capacidad finita.

PROGRAMACIÓN A CAPACIDAD FINITA

Programación a capacidad finita
Programación a corto plazo informatizada, que supera las desventajas de los sistemas basados en reglas, proporcionando al programador cálculos gráficos interactivos.

La programación a corto plazo se conoce cada vez más como programación a capacidad finita[7]. La **programación a capacidad finita (*Finite capacity scheduling,* FCS)** supera las desventajas de los sistemas basados exclusivamente en reglas y proporcionan al programador cálculos y gráficos interactivos. En entornos de programación dinámica, como los talleres (con mucha variedad, poco volumen y recursos compartidos), son de esperar cambios; pero los cambios trastocan los programas. Por tanto, los directores de operaciones tienden a utilizar sistemas de programación a capacidad finita que permiten realizar cambios instantáneos. Los programas a capacidad finita permiten al programador hacer cambios en función de la información disponible un instante antes. Estos programas se presentan normalmente en diagramas de Gantt. Además de incluir diferentes alternativas sobre reglas de prioridad, muchos de los actuales sistemas de programación a capacidad finita también disponen de un "sistema experto", o de técnicas de simulación, y permiten al programador asignar costes a las diversas opciones. El programador tiene flexibilidad para resolver cualquier situación, incluyendo cambios en las órdenes, mano de obra o máquinas.



Este software de Lekin de programación a capacidad finita, presenta un programa para los cinco trabajos y los dos centros de trabajo del Ejemplo 7 anterior en forma de gráfico de Gantt. Este software puede utilizar diferentes reglas de prioridad, diferentes tipos de taller, hasta 50 trabajos, 20 centros de trabajo y 100 máquinas para generar un programa. El software Lekin se encuentra en su CD y puede resolver muchos de los problemas del final de este capítulo.

[7] Los sistemas de programación a capacidad finita reciben diversos nombres, tales como Programación Finita y Sistemas de Planificación Avanzada (APS). También se utiliza a veces la expresión Sistemas de Ejecución de la Fabricación (MES), pero esta denominación tiende a sugerir un énfasis en el sistema de información desde las operaciones en la planta a la actividad de programación.

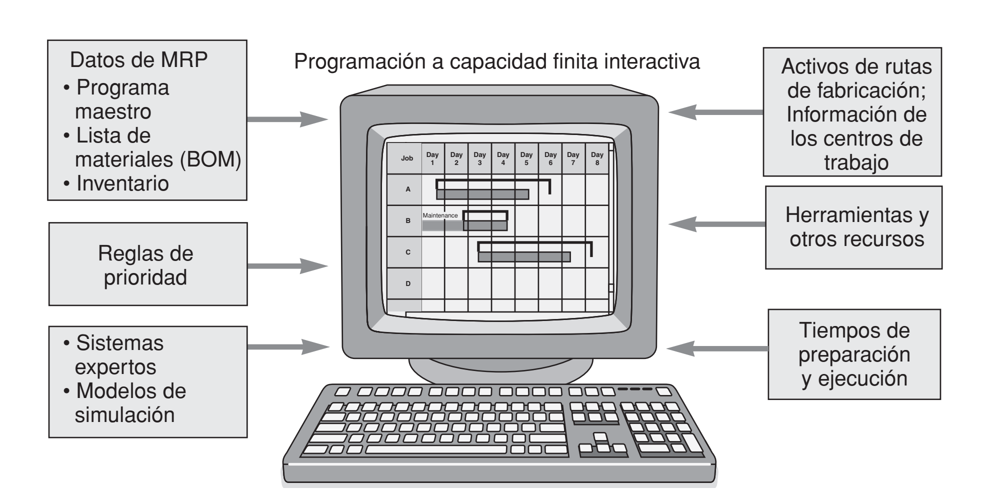


FIGURA 5.5 ■ Los sistemas de programación a capacidad finita combinan los datos de MRP y de producción en la planta para generar un diagrama de Gantt que puede ser manipulado por el usuario en un PC

Los datos iniciales para los sistemas de programación finita suelen ser el output de un sistema MRP. El output de los sistemas MRP aparece tradicionalmente en *buckets* semanales sin ninguna restricción de capacidad. Estos sistemas sólo indican al planificador cuándo se necesita el material, e ignoran los problemas de capacidad. Puesto que los *buckets* de tamaño *infinito* no son realistas ni adecuados para una programación detallada, es necesario refinar los datos del MRP. El output del MRP se combina con los archivos de rutas de fabricación, fechas de entrega, capacidad de los centros de trabajo, necesidades de herramientas y disponibilidad de otros recursos para proporcionar los datos necesarios para una programación a capacidad finita eficaz. Se trata de los mismos datos que se necesitarían en cualquier sistema manual, pero el software FCS (*Finite Capacity Scheduling:* programación a capacidad finita) los formaliza, acelera el análisis y hace que los cambios sean más sencillos. La combinación de los datos de MRP y de FCS, de las reglas de prioridades, de los modelos para facilitar el análisis, así como el diagrama de Gantt, aparecen en la Figura 5.5.

La programación a capacidad finita permite sopesar necesidades de entrega y eficiencia, según las condiciones y órdenes actuales, y no en función de alguna regla definida previamente. El programador decide qué constituye un "buen" programa. Los paquetes de software de FCS, como los de Lekin, Preactor, Asprova y Jobplan, se utilicen en la actualidad en más del 60 por ciento de las fábricas estadounidenses.

TEORÍA DE LAS RESTRICCIONES

El rendimiento total, un concepto importante en las operaciones, es el número de unidades procesadas en la planta y vendidas. El rendimiento total es una diferencia crítica entre una empresa de éxito y una empresa fracasada. Esto ha llevado a un enfoque en las restricciones, algo que se ha popularizado gracias al libro *The Goal: A Process of Ongoing Improvement (La Meta: Un Proceso de Mejora Continua)* de Eliyahu Goldratt y Jeff Cox[8]. La **teoría de las restricciones (*Theory of constraints,* TOC)** es el conjunto de conocimientos que se ocupa de cualquier cosa que limite la capacidad de una organización para alcan-

Teoría de las restricciones (TOC)
Conjunto de conocimientos que tratan con cualquier cosa que limite la capacidad que tiene una organización para alcanzar sus objetivos.

[8] Eliyahu Goldratt y Jeff Cox, *The Goal: A Process of Ongoing Improvement* (Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1986). Para un estudio más general sobre las restricciones, *véanse* D. Nave, "How to Compare Six Sigma, Lean and the Tehory of Constraints", *Quality Progress,* 35 n.º 3 (marzo de 2002): 73-79; y L. Cheng, "Line Balancing vs. Theory of Constraints", *IIE Solutions,* 34, n.º 4 (abril de 2002): pp. 30-33.

zar sus objetivos. Las restricciones pueden ser físicas (como la disponibilidad de proceso o de personal, las materias primas o los suministros) o inmateriales (como procedimientos, moral y formación). Reconocer y gestionar estas limitaciones a través de un proceso de cinco pasos es la base de la teoría de las restricciones:

Paso 1: Identificar las restricciones.
Paso 2: Elaborar un plan para superar las restricciones identificadas.
Paso 3: Concentrar recursos en lograr el paso 2.
Paso 4: Reducir los efectos de las restricciones descargando trabajo o aumentando capacidad. Asegurarse de que las restricciones son reconocidas por todos aquellos que pueden tener influencia sobre ellas.
Paso 5: Una vez que se haya superado un conjunto de restricciones, volver al primer paso e identificar nuevas restricciones.

El recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "La banca y la teoría de las restricciones (TOC)" ilustra estos cinco pasos y muestra que la TOC se utiliza tanto en servicios como en manufactura.

Cuellos de botella

Cuellos de botella
Operación que limita el output en la secuencia de producción.

Los centros de trabajo **cuello de botella** son restricciones que limitan el resultado de la producción. Los cuellos de botella tienen menos capacidad que los centros de trabajo predecesores o posteriores. Limitan el rendimiento total. Los cuellos de botella aparecen con frecuencia porque incluso los sistemas bien diseñados raramente permanecen equilibrados

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

LA BANCA Y LA TEORÍA DE LAS RESTRICCIONES (TOC)

Cuando un banco estadounidense del medio Oeste identificó su eslabón más débil como el departamento de hipotecas, en el que se necesitaba más de un mes para procesar una hipoteca, dirigió su atención a los principios de la TOC para reducir el tiempo medio de procesamiento de una hipoteca. Un equipo multifuncional compuesto por 8 empleados se centró en la mejora del procesamiento de las hipotecas utilizando los cinco pasos que se han destacado en el texto. Utilizando diagramas de flujos, el equipo descubrió que se tardaba demasiado tiempo en (1) inspeccionar y tasar las propiedades y (2) comprobar los datos de empleo del solicitante. Así que el primer paso de la TOC consistió en identificar estas dos restricciones.

El segundo paso de la TOC consistió en desarrollar un plan a fin de reducir el tiempo necesario para comprobar los datos de empleo y realizar las tasaciones. El equipo descubrió que podía reducir la comprobación de la situación laboral a 2 semanas haciendo que el responsable de préstamos pidiese los formularios W-2 de los dos últimos años y el comprobante de nómina del último mes. Encontró una solución parecida para reducir el tiempo necesario para hacer la inspección/tasación.

Como tercer paso, tenía empleados reenfocando sus recursos de manera que las dos actividades con restricciones se pudieran realizar a un alto nivel de eficiencia. El resultado fue una disminución de los gastos operativos y de inventario (dinero, en este ejemplo de banca) y un mayor rendimiento total.

El cuarto paso de la TOC requería que los empleados apoyaran los primeros pasos centrándose en las dos restricciones de tiempo. El banco también asignó una mayor prioridad a la verificación de la situación laboral de forma que la restricción pudiera superarse.

Finalmente, el banco empezó a buscar nuevas restricciones cuando se lograron superar las dos primeras. Como en todos los esfuerzos de mejora continua, el proceso se inicia antes de que se introduzca entre los empleados la autocomplacencia.

Fuentes: Decision Support Systems (marzo de 2001): 451-468; *The Banker's Magazine* (enero-febrero de 1997): 53-59; y *Bank Systems and Technology* (septiembre de 1999): S10.

durante mucho tiempo. Los cambios en los productos, en las combinaciones de productos y en los volúmenes originan a menudo múltiples y variables cuellos de botella. Por consiguiente, existen centros de trabajo cuello de botella en casi todos los procesos de producción, desde hospitales y restaurantes hasta fábricas. Los buenos directores de operaciones resuelven los problemas de cuellos de botella asegurándose de que el cuello de botella permanece ocupado, aumentando la capacidad del cuello de botella, desviando trabajo, cambiando el tamaño del lote, cambiando la secuencia de trabajo o aceptando la inactividad en otras estaciones de trabajo.

Se pueden utilizar diferentes técnicas para tratar los cuellos de botella:

1. Incrementar la capacidad de la restricción. Esto puede requerir una inversión de capital, o más personas, y puede tardar un tiempo en implementarse.
2. Asegurarse de que se dispone de empleados bien formados y flexibles, que aseguren una operativa total y mantenimiento completo del centro de trabajo que provoca la limitación.
3. Desarrollar rutas alternativas, diferentes procedimientos de proceso o subcontratar.
4. Trasladar las inspecciones y los tests a una posición justo anterior al cuello de botella. Este método tiene la ventaja de rechazar cualquier posible unidad defectuosa antes de su entrada en el centro de trabajo cuello de botella.
5. Programar el rendimiento total para que se ajuste a la capacidad del cuello de botella: esto puede significar programar menos carga de trabajo en los centros de trabajo que suministran al cuello de botella.

Como ejemplo, la restricción del hospital Arnold Palmer para no poder atender más partos era la disponibilidad de camas en el hospital. La solución *a largo plazo* para este cuello de botella fue añadir más capacidad vía un proyecto de construcción de 4 años (*véanse* los casos de estudio en vídeo del Capítulo 3 y el Suplemento 7 del volumen *Decisiones Estratégicas*). Puesto que no se podía superar la restricción *inmediata* programando los bebés (éstos nacen cuando lo deciden ellos), el personal del hospital desarrolló un nuevo proceso para ayudar a reducir el cuello de botella. La solución: si una mujer preparada para recibir el alta no podía ser recogida antes de la cinco de la tarde, el propio personal del hospital llevaba a la mujer y al bebé a su casa en su vehículo particular. Esto no sólo liberaba una cama para el siguiente paciente, sino que se creaba una buena relación y una buena reputación para el hospital.

Tambor, amortiguador, cuerda

Tambor, amortiguador y cuerda (*drum, bufer, rope*) es otra idea derivada de la teoría de las restricciones. En este contexto, el *tambor* es el ritmo del sistema. Proporciona el programa: el ritmo de producción. El *amortiguador* es el recurso, normalmente inventario, necesario para que la restricción (restricciones) se mantenga operando a plena capacidad. Y la *cuerda* proporciona la sincronización necesaria para tirar de las unidades a través del sistema. Se puede pensar en la cuerda como señales *kanban*.

PROGRAMACIÓN EN INSTALACIONES DE FABRICACIÓN REPETITIVA

Los objetivos de programación definidos al principio de este capítulo también son adecuados para la fabricación repetitiva. Recuérdese que en el Capítulo 7 del volumen *Deci-*

siones Estratégicas vimos que los fabricantes repetitivos producen productos estándar a partir de módulos. Los productores repetitivos desean satisfacer las demandas de los clientes, reducir la inversión en inventario, reducir el tamaño de la tanda de producción (o lote) y utilizar el equipo y los procesos. La forma de avanzar hacia esos objetivos es tender a un programa de uso estable del material. **Uso estable del material** significa lotes frecuentes, de gran calidad, de pequeño tamaño que contribuyen a la producción justo a tiempo. Esto es exactamente lo que hacen fabricantes de clase mundial como Harley-Davidson y John Deere. Las ventajas del uso estable del material son:

Uso estable del material Utilización de lotes pequeños, frecuentes, de gran calidad que contribuyen a la producción justo a tiempo (JIT).

1. Menores niveles de inventario, lo que deja capital libre para otros usos.
2. Fabricación más rápida de los productos, es decir, menores tiempos de entrega.
3. Mejor calidad de los componentes y, por tanto, mejor calidad de los productos.
4. Reducción de las necesidades de espacio en la planta manufacturera.
5. Mejor comunicación entre los empleados debido a que están más cerca unos de otros (lo que puede dar lugar a un mejor trabajo en equipo, y un *esprit de corps —sentido de pertenencia—*).
6. Un proceso de producción estable porque los grandes lotes no han "ocultado" los problemas.

Suponga un productor repetitivo que fabrica grandes lotes mensuales. Con un programa de uso estable del material, la dirección tendería a la reducción de este ciclo mensual a uno semanal, diario o incluso de horas.

Una forma de elaborar un programa de uso estable del material consiste en determinar primero el tamaño de lote mínimo que mantendrá en movimiento el proceso de producción. Esto se ilustra en el capítulo siguiente, "Sistemas justo a tiempo y producción ajustada".

PROGRAMACIÓN EN SERVICIOS

La programación de los sistemas de servicios se diferencia de la programación de los sistemas manufactureros en varios aspectos:

- En la manufactura el énfasis de la programación se pone en las máquinas y en los materiales; en los servicios se pone en los niveles de personal.
- Los inventarios permiten alisar la demanda en el caso de las manufacturas, pero muchos sistemas de servicio no tienen inventarios.
- Los servicios son intensivos en mano de obra, y la demanda de esta mano de obra puede ser muy variable.
- Aspectos legales, como la legislación sobre salarios y horarios, y los convenios colectivos firmados con los sindicatos que limitan el número de horas que se puede trabajar por turno, semana o mes, constituyen restricciones en las decisiones sobre programación.
- Puesto que los servicios normalmente programan personas en vez de materiales, las cuestiones relativas al comportamiento, relaciones sociales, antigüedad y estatus son más importantes y pueden complicar la programación.

Los siguientes ejemplos destacan la complejidad de la programación de los servicios.

Hospitales Un hospital es un ejemplo de instalación de servicios que debe utilizar un sistema de programación tan complejo como el que se puede encontrar en un taller. Los hospitales raramente utilizan un sistema de prioridades como el de primero en llegar, primero

en atender (FCFS) para tratar a los pacientes de urgencias. Sin embargo, programan productos (como las cirugías) como lo hace una fábrica, y su capacidad debe hacer frente a una amplia variabilidad en la demanda.

Bancos La formación polivalente de los empleados de un banco permite, por ejemplo, que personal del departamento de préstamos y de otros puestos de gestión preste ayuda a corto plazo a los cajeros si hay un incremento en la demanda. Los bancos emplean también personal a tiempo parcial para proporcionar una capacidad variable.

Compañías aéreas Las compañías aéreas deben hacer frente a dos restricciones al programar las tripulaciones de vuelo: (1) una compleja serie de restricciones en los tiempos de trabajo de la FAA (Federal Aviation Administration, Administración de la Aviación Civil) y (2) convenios colectivos que garantizan un salario determinado a la tripulación por determinado número de horas cada día o cada viaje. Los planificadores de las compañías deben elaborar programas para la tripulación que satisfagan o superen sus sueldos garantizados. Los planificadores también deben usar eficientemente su otro costoso recur-

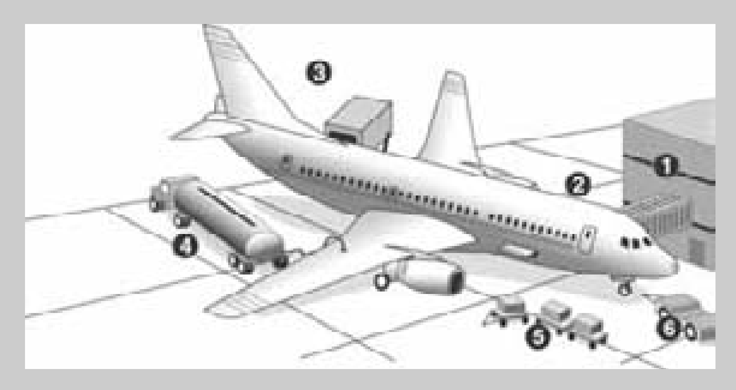
DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

PROGRAMACIÓN DE LA OPERACIÓN DE EMBARQUE Y DESEMBARQUE DE UN AVIÓN

Las compañías aéreas, que afrontan un futuro financiero cada vez más difícil, recientemente han descubierto la importancia de programar eficientemente las operaciones de embarque y desembarque de los aviones. Para algunos transportistas de bajo coste y vuelos sin escala (punto a punto), como Southwest Airlines, una política de programas de embarque y desembarque en 20 minutos ha sido el estándar aplicado durante años. Sin embargo, en otros casos, como Continental, United y US Airways, el procedimiento es nuevo. Esta ilustración muestra cómo US Airways trata de acelerar la programación de estas actividades. En la actualidad, sus aviones efectúan una media de 7 vuelos diarios, en lugar de los 6 que hacían antes, lo que significa que el transportista puede vender decenas de miles de asientos más al día.

Fuentes: US Airways, Boeing, Knight Ridder Business Tribune News (6 de octubre de 2004): 1; y *Aviation Week & Space Technology* (29 de enero de 2001): 50.

US Airways está reduciendo el tiempo de embarque y desembarque en vuelos comerciales, de los actuales 45 minutos a 20 minutos en los Boeing 737. Debajo se muestra una lista de los procedimientos que deben completarse antes de que pueda despegar el avión.



1. El agente de billetes lleva el plan de vuelo al piloto, que introduce la información en el PC del avión. Unos 130 pasajeros desembarcan del avión.
2. Los empleados limpian los cubos de basura, los asientos, los aseos, etc.
3. El personal del servicio de comidas (*catering*) sube a bordo del avión y aprovisiona de bebidas y hielo.
4. Un camión de combustible introduce hasta 20.000 litros de combustible en las alas del avión.
5. Los mozos de carga descargan hasta 1.800 kilos de equipaje y 900 de mercancías. Los cargadores llevan rápido las maletas al área de "recogida de equipajes", en la terminal.
6. Los agentes de rampa, que ayudan a aparcar el avión cuando aterriza, lo alejan ahora de la puerta de embarque.

so: el avión. Estos programas se realizan normalmente utilizando modelos de programación lineal. El recuadro sobre *Dirección de producción en acción* “Programación de la operación de embarque y desembarque de un avión” explica cómo programaciones de muy corta duración (20 minutos) pueden ayudar a ser más eficiente a una compañía aérea.

Operaciones 24/7 Las líneas telefónicas de atención de emergencias, los parques de bomberos y policía, las compañías telefónicas y los negocios de compra por correo (como L.L. Bean) tienen que programar a sus empleados las 24 horas del día, 7 días por semana. Para que la dirección tenga flexibilidad en la programación del personal, se puede recurrir a veces a la contratación de empleados a tiempo parcial. Esta solución presenta tanto ventajas (al utilizar turnos con una duración poco habitual, o para ajustarse a cargas de trabajo anticipadas) como problemas (dado el elevado número de posibles alternativas en lo referente a días de fiesta, horas de comida, periodos de descanso, horas de inicio de turno). La mayoría de las empresas utilizan sistemas informáticos de programación para poder abordar esta complejidad.

A pesar de la complejidad en la programación de los sistemas de servicio, el personal de operaciones debe ajustar la capacidad a la demanda del consumidor. En la industria de los servicios se conoce la programación de los consumidores como *gestión de la demanda*, y la programación del personal como *gestión de la capacidad*.

Para organizar sus cientos de puestos minoristas de galletas, Debbi Fields decidió utilizar su experiencia para diseñar un sistema de programación en el que cualquier tienda pudiera entrar a cualquier hora. Su software se aprovechó de la experiencia de la central para la programación de empleados de salario mínimo, que son la principal ayuda en ventanilla. Prepara un horario de trabajo, incluidos descansos, elabora una estimación total de la cantidad de masa que debe procesarse en todo el día, y muestra los progresos y las ventas según las horas. El sistema de programación dice incluso cuándo debe el personal reducir la producción y empezar a ofrecer muestras gratuitas a los clientes que pasan.

Gestión de la demanda Cuando la demanda y la capacidad están bastante ajustadas, la gestión de la demanda puede ser manejada a menudo con asignación de citas u horas, reservas, o siguiendo la regla del primero en llegar, primero en servir. En algunos negocios, como en las consultas de los médicos o los bufetes de abogados, la programación se hace con un *sistema de citas* y es un sistema válido. Los *sistemas de reservas* funcionan bien en las agencias de alquiler de automóviles, los hoteles y algunos restaurantes como medio para minimizar el tiempo de espera del cliente y para evitar la decepción del cliente por no poder recibir el servicio. En los comercios, las oficinas de correos o en un restaurante de comida rápida, la regla de *primero en llegar, primero en servir* para atender a los consumidores puede ser suficiente. Como señalamos antes, cada industria desarrolla sus propios enfoques para ajustar capacidad y demanda. Otros planteamientos más agresivos de la gestión de la demanda incluyen diferentes tratamientos de los descuentos: precios especiales para los “clientes madrugadores (comer a primeras horas)” en los restaurantes, descuentos para las sesiones matinales o por un billete en una hora poco habitual en un vuelo, y tarifas reducidas para las llamadas telefónicas durante los fines de semana.

Gestión de la capacidad Cuando no es posible gestionar la demanda, una opción puede ser gestionar la capacidad mediante cambios en la plantilla a tiempo completo, temporal o a tiempo parcial para ayudar durante determinados periodos.

Programación de empleados del sector servicios mediante la programación cíclica

Existen diferentes técnicas y algoritmos para la programación de empleados en el sector servicios, como oficiales de policía, enfermeras, camareros, cajeros y vendedores en los comercios. Los directivos que intentan definir horarios pertinentes y eficientes que mantengan contentos a los empleados, pueden dedicar una significativa parte del tiempo todos los meses a elaborar los horarios de sus empleados. Estos horarios a menudo consideran un periodo de planificación bastante largo (por ejemplo, 6 semanas). Una técnica que es factible y simple a la vez es la *programación cíclica*.

Programación cíclica La programación cíclica con necesidades de personal variables suele producirse en servicios como los restaurantes y la policía. Aquí, el objetivo se centra en crear un programa con el mínimo número posible de trabajadores[9]. En estos casos cada empleado se asigna a un turno y tiene su tiempo de descanso. *Véase* el Ejemplo 8.

Utilizando el enfoque del Ejemplo 8, el Hospital General de Colorado ahorró una media de 10 a 15 horas al mes, y observó estas ventajas añadidas: (1) no se necesitaba ninguna computadora, (2) las enfermeras estaban contentas con el programa, (3) los ciclos se podían cambiar durante las diferentes estaciones (para atender a los esquiadores "fogosos"), y (4) la contratación de personal resultaba más fácil debido a la previsibilidad y flexibilidad. Este enfoque proporciona un óptimo aunque puede haber soluciones óptimas múltiples.

Se han desarrollado otras técnicas de programación cíclica para ayudar en la programación de los servicios. Algunos enfoques recurren a la programación lineal: ésta es la forma en que Hard Rock Café programa sus servicios (*véase* el caso de estudio en vídeo al final de este capítulo). Hay una tendencia natural en la programación hacia la utilización de herramientas que se entiendan bien y proporcionen soluciones aceptables.

EJEMPLO 8

Programación cíclica

La administradora del hospital, Doris Laughlin, quiere definir el horario de los trabajadores del pabellón de oncología utilizando una semana laboral estándar de 5 días con dos días consecutivos de descanso; pero también quiere minimizar el número de empleados. Sin embargo, como en la mayoría de los hospitales, tiene una demanda variable. Los fines de semana tienen poca demanda. Los médicos tienden a trabajar más a principios de la semana, y los pacientes alcanzan un máximo los miércoles para ir disminuyendo después. Ha determinado las siguientes necesidades de personal. A continuación se muestra un proceso en cinco pasos.

1. Determinar las necesidades máximas de personal. Doris lo ha hecho de la siguiente manera:

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Personal necesario	5	5	6	5	4	3	3

2. Identifique los dos días consecutivos que tienen la *menor necesidad total de personal* y señálelos con un círculo. Asigne estos dos días libres al primer empleado. En este caso, el primer empleado tiene libres el sábado y el domingo porque 3 más 3 es la *menor suma* de dos días cualesquiera. En caso de empate, elija los días con el menor requisito adyacente. Si hay más de una posibilidad, tome una decisión arbitraria.

3. Ahora tenemos un empleado que trabaja cada uno de los días sin círculo; por tanto, creamos una nueva fila para el siguiente empleado restando 1 de la primera fila (porque ya se ha trabajado un día), excepto para los días con un círculo (los que representan días en que no se ha trabajado) y para cualquier día que tenga un cero. Es decir, no restar de un día que tenga un círculo o de un día con valor cero.

4. En la nueva fila, identifique los dos días consecutivos que tienen la menor necesidad total y márquelos con un círculo. Asigne el siguiente empleado a los días restantes.

5. Repita el proceso (pasos 3 y 4) hasta que se satisfagan todas las necesidades de personal.

---

[9] *Véase* Vinh Quan, "Retail Labor Scheduling", *OR/MS Today,* 31, n.º 6 (diciembre de 2004): pp. 32-35; o G. Laporte, "The Art and Science of Designing Rotating Schedules", *Journal of the Operational Research Society,* 50, n.º 10 (1999): pp. 1011-1017.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Empleado 1	5	5	6	5	4	(3)	(3)
Empleado 2	4	4	5	4	3	(3)	(3)
Empleado 3	3	3	4	3	(2)	(3)	3
Empleado 4	2	2	3	(2)	(2)	3	2
Empleado 5	(1)	(1)	2	2	2	2	1
Empleado 6	1	1	1	1	1	(1)	(0)
Empleado 7						1	
Capacidad	5	5	6	5	4	3	3
Exceso de capacidad	0	0	0	0	0	1	0

Doris necesita 6 empleados a tiempo completo para satisfacer sus necesidades de personal y un empleado que trabaje el sábado.

Observe que la capacidad (número de empleados) es igual a las necesidades de personal, siempre y cuando un empleado trabaje horas extras en sábado o se contrate a un empleado a tiempo parcial para trabajar en sábado. Si se contrata a un empleado a tiempo completo para satisfacer la necesidad del sábado, entonces ese empleado podrá tener dos días libres cualesquiera, excepto el sábado, y la capacidad será mayor que las necesidades en un trabajador cada día que trabaje ese empleado (excepto el sábado).

RESUMEN

La programación implica la sincronización de las operaciones para lograr un movimiento eficiente de las unidades a través del sistema. Este capítulo aborda las cuestiones relativas a la programación a corto plazo en entornos enfocados a proceso, en entornos repetitivos y en entornos de servicios. Vimos que las instalaciones enfocadas a proceso son sistemas de producción cuyos productos se realizan según pedido de los clientes, y que la programación de sus tareas puede convertirse en algo complicado. Se han presentado diferentes aspectos y enfoques para la programación, carga y secuenciación de los trabajos. Éstos van desde los diagramas de Gantt y los métodos de asignación para la programación hasta una serie de reglas de prioridad, la regla del índice crítico, el algoritmo de Johnson para secuenciación, y la programación a capacidad finita. También se ha analizado la teoría de las restricciones y el concepto de cuello de botella.

Los sistemas de servicio difieren generalmente de los sistemas de fabricación. Esto lleva a la utilización de sistemas de citas, sistemas de primero en llegar, primero en ser servido (FCFS); y sistemas de reserva, así como métodos heurísticos y de programación lineal para ajustar la capacidad a la demanda en los entornos de servicio.

TÉRMINOS CLAVE

Programación hacia adelante (*forward*) *(p. 204)*
Programación hacia atrás (*backward*) *(p. 204)*
Archivos de planificación *(p. 208)*
Archivos de control *(p. 208)*
Carga de trabajos *(p. 208)*
Control input-output *(p. 209)*
Tarjetas ConWIP *(p. 210)*
Diagramas de Gantt *(p. 210)*
Método de asignación *(p. 212)*
Secuenciación *(p. 21)*
Reglas de prioridad *(p. 215)*
Primero en llegar, primero en atender (FCFS) *(p. 215)*
Tiempo de proceso más corto (SPT) *(p. 215)*

Fecha de entrega más temprana (EDD) *(p. 215)*
Tiempo de proceso más largo (LPT) *(p. 215)*
Índice crítico (IC) *(p. 218)*
Regla de Johnson *(p. 220)*
Programación a capacidad finita *(p. 222)*
Teoría de las restricciones (TOC) *(p. 223)*
Cuello de botella *(p. 224)*
Uso estable del material *(p. 226)*

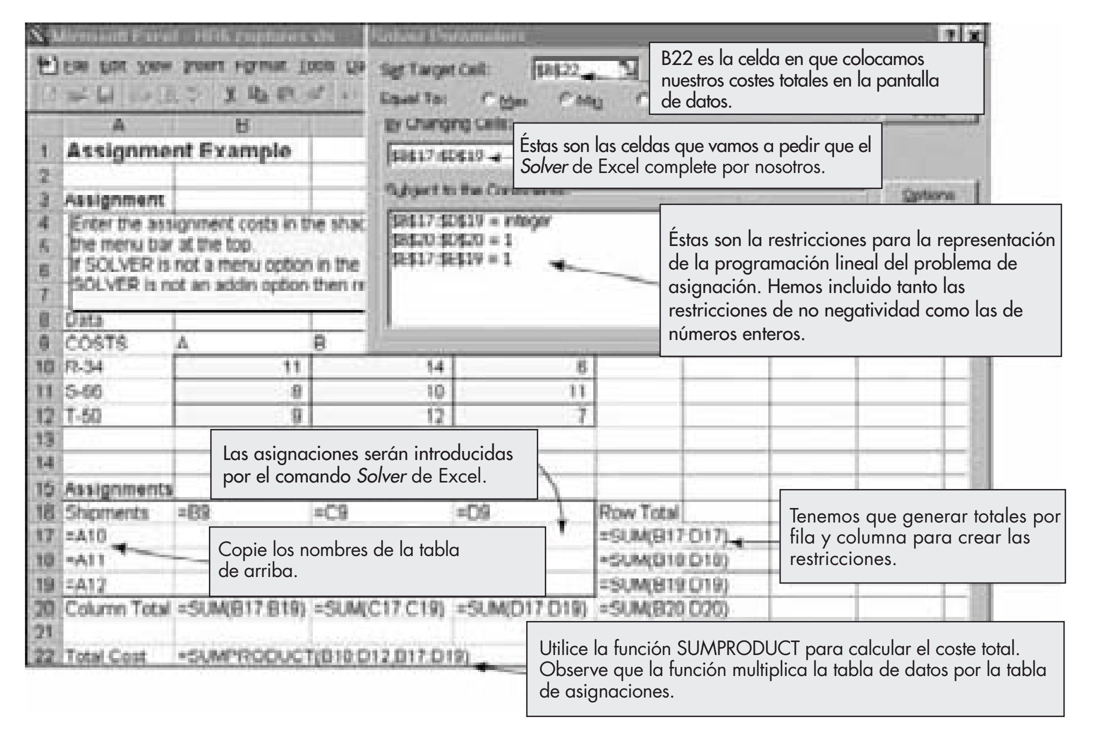
CÓMO UTILIZAR EL SOFTWARE PARA LA PROGRAMACIÓN A CORTO PLAZO

Además del software comercial que se ha presentado en este capítulo, se pueden resolver los problemas de programación a corto plazo utilizando el software OM que viene con el CD del texto. POM para Windows también incluye un módulo de programación. A continuación se explica cómo se utilizan estos programas.

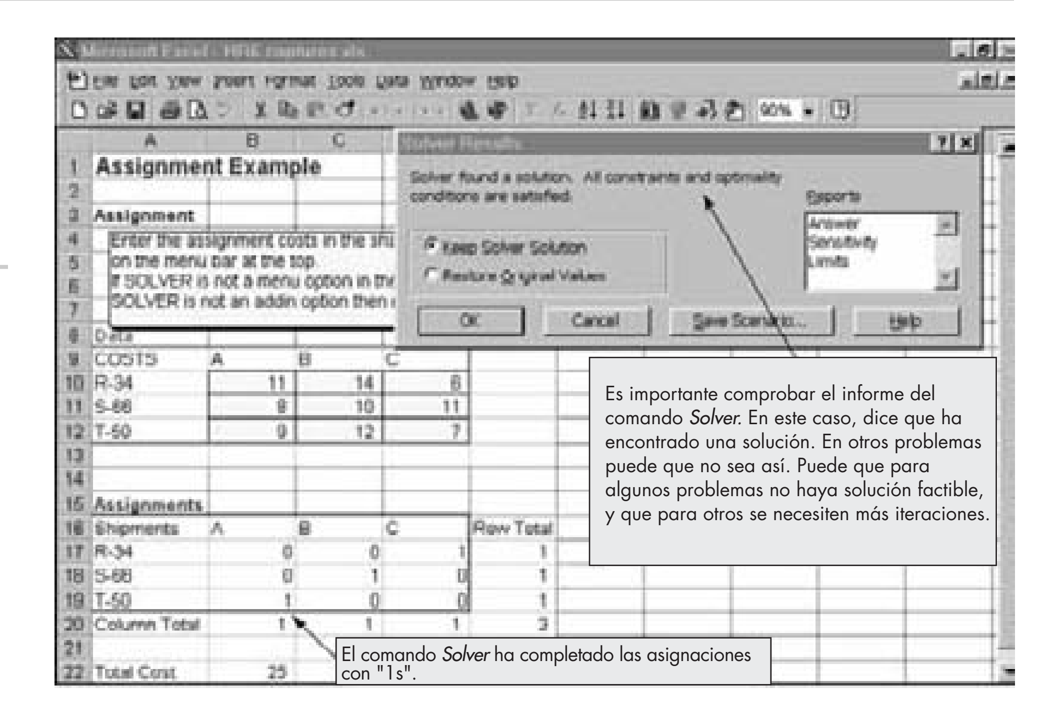


Cómo utilizar Excel OM

El programa Excel OM tiene dos módulos para ayudar a resolver los problemas de programación a corto plazo: Asignación y Programación del taller. El módulo de Asignación se presenta en los Programas 5.1 y 5.2. La pantalla de inputs, que emplea los datos del Ejemplo 4, aparece en primer lugar, como Programa 5.1. Una vez introducidos todos los datos, elegimos el comando Herramientas (*Tools*), seguido del comando Resolver (*Solver*). El *Solver* de Excel utiliza la programación lineal para optimizar los problemas de asignación. Las restricciones también se muestran en el Programa 5.1. Seleccionamos entonces el comando Resolver (Solver) y la solución aparece en el Programa 5.2.

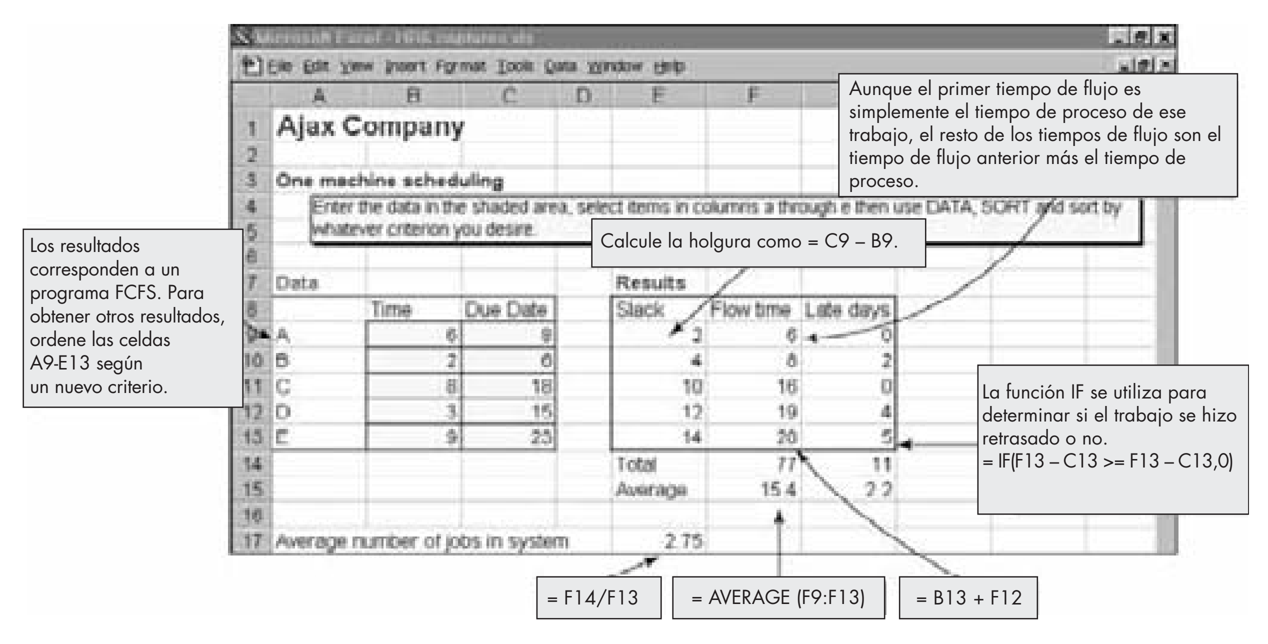


PROGRAMA 5.1 ■ Módulo de asignación de Excel OM



PROGRAMA 5.2 ■ Pantalla de resultados del programa Excel OM para el problema de asignación descrito en el Programa 5.1

El módulo para la programación del taller de Excel OM se muestra en el Programa 5.3. Este programa utiliza los datos del Ejemplo 5. Como los trabajos están enumerados según la secuencia en que llegaron (*véase* la columna A), los resultados corresponden a la regla FCFS. El Programa 5.3 también muestra algunas de las fórmulas (columnas E, F, G) utilizadas en los cálculos.



PROGRAMA 5.3 ■ Módulo de programación del taller de Excel OM aplicado a los datos del Ejemplo 5

Para resolverlo con la regla SPT, necesitamos cuatro pasos intermedios: (1) Seleccionar los datos en las columnas A, B, C para todos los trabajos; (2) acudir al comando Datos (*Data*); acudir al comando Ordenar (*Sort*); y (4) ordenar por Tiempo (*Time*) (columna B) en orden *ascendente (ascending)*. Para resolverlo mediante EDD, el paso 4 cambia para ordenar por la Fecha de Entrega (*Due Date*) (columna C) en orden *descendente (descending)*.



Cómo utilizar POM para Windows

POM para Windows puede tratar las dos categorías de problemas de programación que vemos en este capítulo. Su módulo de asignación se utiliza para resolver el problema tradicional de asignación uno a uno de personas a tareas, máquinas a trabajos, etcétera. Su módulo de programación del taller puede resolver un problema de taller para una o dos máquinas. Las reglas de prioridad disponibles son SPT, FCFS, EDD y LPT. Una vez que se han introducido todos los datos, se pueden examinar a su vez cada una de las reglas de prioridad. *Véase* el Apéndice IV para ver aspectos concretos del software POM para Windows.



PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto 5.1

King Finance Corporation, con sede en Nueva York, desea asignar a tres licenciados que acaba de contratar, Julie Jones, Al Smith y Pat Wilson, a sus oficinas regionales. Si embargo, la empresa tiene también una vacante en Nueva York, y quiere enviar allí a uno de los tres si resulta más económico que enviarlo a Omaha, Dallas o Miami. Trasladar a Jones a la oficina de Nueva York costaría 1.000 dólares, 800 colocar a Smith, y 1.500 el llevar a Wilson. ¿Cuál es la asignación óptima de personal a las oficinas?

OFICINA / EMPLEADO	OMAHA	MIAMI	DALLAS
Jones	800$	1.100$	1.200$
Smith	500$	1.600$	1.300$
Wilson	500$	1.000$	2.300$

Solución

a. La tabla de costes tiene una cuarta columna que representa Nueva York. Para "equilibrar" el problema se agrega una fila "ficticia" (persona) con un coste de traslado de cero para cada ciudad.

OFICINA / EMPLEADO	OMAHA	MIAMI	DALLAS	NUEVA YORK
Jones	800$	1.100$	1.200$	1.000$
Smith	500$	1.600$	1.300$	800$
Wilson	500$	1.000$	2.300$	1.500$
Dummy	0	0	0	0

b. Reste el menor número de cada fila y "cubra" con líneas rectas todos los ceros (las restas por columnas darán los mismos números, así que no serán necesarias).

OFICINA / EMPLEADO	OMAHA	MIAMI	DALLAS	NUEVA YORK
Jones	0	300	400	200
Smith	0	1.100	800	300
Wilson	0	500	1.800	1.000
Dummy	0	0	0	0

c. Reste el menor número no cubierto (200), súmelo en las celdas en que se cortan dos líneas y cubra todos los ceros.

OFICINA / EMPLEADO	OMAHA	MIAMI	DALLAS	NUEVA YORK
Jones	0	100	200	0
Smith	0	900	600	100
Wilson	0	300	1.600	800
Dummy	200	0	0	0

d. Reste el menor número no cubierto (100), súmelo en las celdas en que se cortan dos líneas y cubra todos los ceros.

OFICINA / EMPLEADO	OMAHA	MIAMI	DALLAS	NUEVA YORK
Jones	0	0	100	0
Smith	0	800	500	100
Wilson	0	200	1.500	800
Dummy	300	0	0	100

e. Reste el menor número no cubierto (100), súmelo en las celdas en que se cortan dos líneas y cubra todos los ceros.

OFICINA / EMPLEADO	OMAHA	MIAMI	DALLAS	NUEVA YORK
Jones	100	0	100	0
Smith	0	700	400	0
Wilson	0	100	1.400	700
Dummy	400	0	0	100

f. Como se necesitan cuatro líneas para cubrir todos los ceros, se puede hacer una asignación óptima en las casillas con cero. Se asignará:

Wilson a Omaha
Jones a Miami
Ficticio (nadie) a Dallas
Smith a Nueva York

Coste = 0$ + 500$ + 800$ + 1.100$ = 2.400$

Problema Resuelto 5.2

Un contratista de defensa en Dallas tiene seis trabajos pendientes de procesamiento. Los tiempos de proceso y las fechas de entrega comprometidas se muestran a continuación. Establezca la secuencia de procesamiento según la regla FCFS y evalúela.

Trabajo	Tiempo de proceso del trabajo (días)	Fecha de entrega del trabajo (días)
A	6	22
B	12	14
C	14	30
D	2	18
E	10	25
F	4	34

Solución

La FCFS da la secuencia A-B-D-E-F.

Secuencia de trabajo	Tiempo de proceso del trabajo	Tiempo de flujo	Fecha de entrega	Retraso del trabajo
A	6	6	22	0
B	12	18	14	4
C	14	32	30	2
D	2	34	18	16
E	10	44	25	19
F	4	48	34	14
	48	182		55

1. Tiempo medio de finalización =182/6 = 30,33 días
2. Número medio de trabajos en el sistema = 182/48 = 3,79 trabajos
3. Retraso medio del trabajo = 55/6 = 9,16 días
4. Utilización = 48/182 = 26,4%

Problema Resuelto 5.3

La empresa de Dallas del Problema Resuelto 5.2 quiere examinar también la secuencia de trabajo mediante la regla de prioridad SPT. Aplique SPT a los mismos datos y haga una recomendación.

Solución

La regla SPT da la secuencia D-F-A-E-B-C.

Secuencia de trabajo	Tiempo de proceso del trabajo	Tiempo de flujo	Fecha de entrega	Retraso del trabajo
D	2	2	18	0
F	4	6	34	0
A	6	12	22	0
E	10	22	25	0
B	12	34	14	20
C	14	48	30	18
	48	124		38

1. Tiempo medio de finalización = 124/6 = 20,67 días
2. Número medio de trabajos en el sistema = 124/48 = 2,58 trabajos
3. Retraso medio del trabajo = 38/6 = 6,33 días
4. Utilización = 48/124 = 38,7%

SPT es superior a FCFS en este caso para las cuatro medidas. Sin embargo, si se tuviera que analizar también la regla EDD, se descubriría que el retraso medio de los trabajos es el más bajo, con 5,5 días. SPT es una buena recomendación. La mayor desventaja de SPT es que algunas veces hace esperar a los trabajos de más duración durante mucho tiempo.

Problema Resuelto 5.4

Mediante la regla de Johnson halle la secuencia óptima para procesar los trabajos que se muestran a continuación a través de dos centros de trabajo. Los tiempos en cada centro se dan en horas.

Trabajo	Centro de trabajo 1	Centro de trabajo 2
A	6	12
B	3	7
C	18	9
D	15	14
E	16	8
F	10	15

Solución

B	**A**	**F**	**D**	**C**	**E**

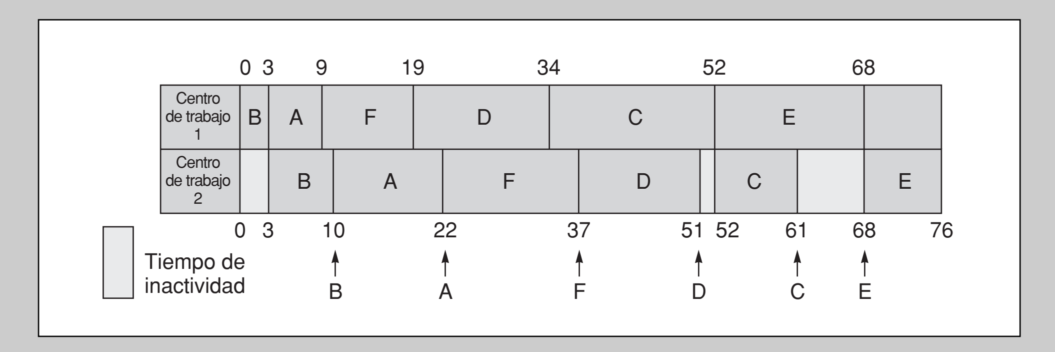
Los tiempos de secuencia son

Centro de trabajo 1	3	6	10	15	18	16
Centro de trabajo 2	7	12	15	14	9	8

Problema Resuelto 5.5

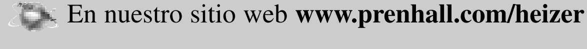
Ilustre el tiempo de producción y el tiempo de inactividad en los dos centros de trabajo del Problema Resuelto 5.4 construyendo una gráfica en el tiempo.

Solución



EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.



- Problemas en Internet
- Casos de estudio en Internet
- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Visita virtual a una empresa

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Videoclip y caso de estudio en vídeo
- Ejercicio Active Model
- Excel OM
- Archivos de datos para ejemplos de Excel OM
- Software de programación Lekin
- POM para Windows

CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. ¿Cuál es el objetivo general de la programación?

2. Explique los cuatro criterios para determinar la eficacia de una decisión de *programación*. ¿Cómo se relacionan estos criterios con los cuatro criterios para las decisiones de *secuenciación*?

3. Describa qué se quiere decir con "cargar" los centros de trabajo. ¿De qué dos maneras se pueden cargar los centros de trabajo? ¿Cuáles son las dos técnicas utilizadas en la carga?

4. Nombre cinco reglas de prioridad para la secuenciación. Explique de qué manera asigna las tareas cada una de ellas.

5. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de la regla del tiempo de proceso más corto (SPT)?

6. ¿Qué es una fecha de entrega solicitada o comprometida?
7. Explique los términos “tiempo del flujo” y “retraso”.
8. ¿Qué regla de programación del taller preferiría aplicar si fuera el líder del único equipo de expertos encargado de la desactivación de varias bombas de relojería repartidas por todo un edificio? Puede ver las bombas: son de distintos tipos. Sabe cuánto tiempo necesita para desactivar cada bomba. Explique la respuesta.
9. ¿Cuándo es mejor aplicar la regla de Johnson en la programación del taller?
10. Defina las cuatro medidas de eficacia de las reglas para secuenciar (despachar) trabajos.
11. ¿Cuáles son los pasos del método de asignación de la programación lineal?
12. Defina el proceso de cinco pasos que sirve de base a la teoría de las restricciones.
13. ¿Qué ventajas presenta el flujo de materiales estable?
14. ¿Cuáles son las técnicas de que disponen los directores de operaciones para resolver un cuello de botella? ¿Cuál de ellas no aumenta la producción?
15. ¿Qué es el control input-output?



DILEMA ÉTICO

La programación de las personas que trabajan en el segundo y tercer turno (tarde y noche) es un problema en la mayoría de las empresas que funcionan las 24 horas del día. El recuadro sobre *Dirección de producción en acción* “No es fácil programar a trabajadores que se quedan dormidos en el trabajo” describe aspectos potencialmente peligrosos que se presentan en el turno de noche de Federal Express, en una refinería de petróleo y en un departamento de policía. Tal vez aún más significativo es que los datos ergonómicos indican que el cuerpo humano no responde bien a cambios importantes en su natural ritmo circadiano de dormir. También hay importantes problemas de salud a largo plazo cuando se producen cambios frecuentes en los ciclos de trabajo y de sueño.

Imagínese que es usted el director de una acería sin sindicato que tiene que funcionar las 24 horas del día, y donde las exigencias físicas hacen que los turnos de ocho horas sean preferibles a turnos de 10 o 12 horas. Sus empleados, en quienes se han delegado responsabilidades, han decidido que quieren trabajar en turnos rotativos que cambian semanalmente. Es decir, quieren un ciclo de trabajo repetitivo de, una semana de siete de la mañana a tres de la tarde, una segunda semana de tres de la tarde a once de la noche, y una tercera semana de once de la noche a siete de la mañana. Usted está seguro de que no se trata de una buena idea, tanto en lo que respecta a la productividad como en lo que se refiere a la salud a largo plazo de los empleados. Si no acepta su decisión, minará el programa de potenciación de los empleados, provocará un problema de desmoralización y, tal vez aún más importante, cree más respaldo a favor de crear un sindicato. ¿Cuál es su postura ética y qué decide hacer?



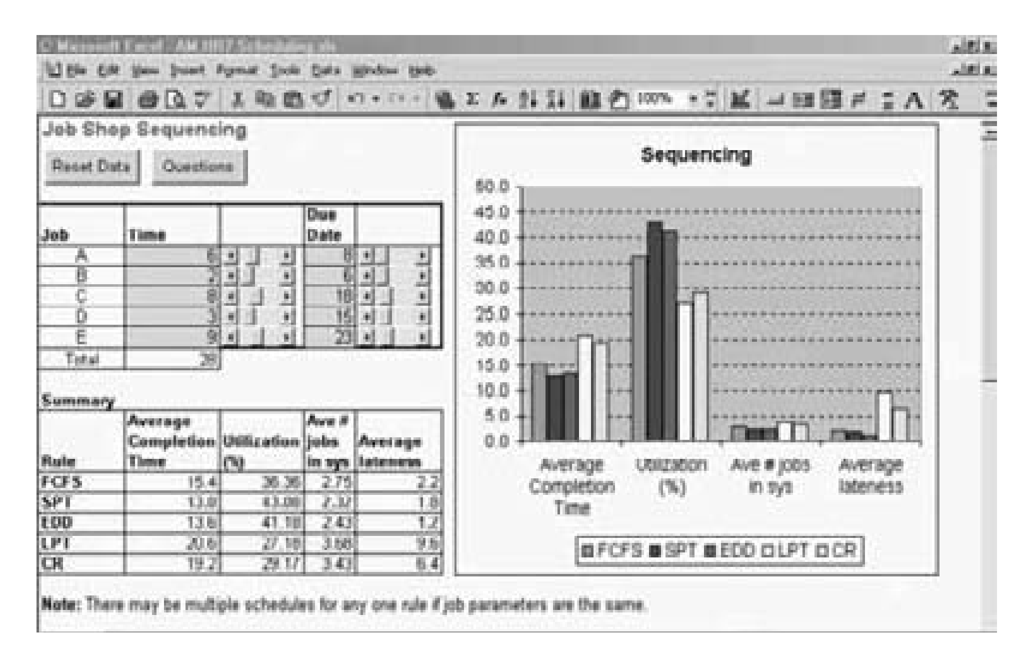
EJERCICIO ACTIVE MODEL

Este ejercicio, que puede encontrar en su CD-ROM, le permite evaluar cambios en los datos introducidos en el modelo de secuenciación del taller.

Preguntas

1. ¿Qué programa (regla) minimiza el tiempo medio de finalización, maximiza la utilización y minimiza el número medio de trabajos en el sistema para este ejemplo?
2. Utilice la barra de desplazamiento para cambiar el tiempo de proceso del trabajo C y para modificar la fecha de entrega deseada del trabajo C. ¿Minimiza siempre la misma regla el tiempo medio de finalización?
3. ¿Qué programa (regla) minimiza el retraso medio en este ejemplo?

ACTIVE MODEL 15.1
■ Un análisis de la secuenciación de trabajos utilizando los datos de la empresa de arquitectura del Ejemplo 5



4. Utilice la barra espaciadora para cambiar la fecha de entrega solicitada del trabajo C. ¿Minimiza siempre la misma regla el retraso medio?



PROBLEMAS*

• **5.1.** La empresa de excavaciones de Ron Satterfield ha programado cinco trabajos. Hoy, que es el final del día 7, Ron está revisando el diagrama de Gantt que representa estos trabajos programados.

- El trabajo #151 fue programado para empezar el día 3 y durar 6 días. Actualmente va un día por delante del programa.
- El trabajo #177 se programó para empezar el día 1 y durar 4 días. Actualmente está dentro del tiempo previsto.
- El trabajo #179 se programó para empezar el día 7 y durar 2 días. De hecho, empezó el día 6 y progresa según el plan.
- El trabajo #211 se programó para empezar el día 5, pero la falta de un equipo lo retrasó hasta el día 6. Progresa según lo esperado y debería tardar 3 días.
- El trabajo #215 fue programado para empezar el día 4 y durar 5 días. Empezó a tiempo, pero se ha retrasado 2 días.

Dibuje el diagrama de la forma en que lo ve Ron.

: **5.2.** First Printing & Copy Center tiene 4 trabajos más para programar, además de los mostrados en el Ejemplo 3 de este capítulo. Al final del día 4, el personal de programación de la producción está revisando el diagrama de Gantt.

---

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; ✗ significa que se puede resolver el problema con Excel OM; **P**✗ significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

- El trabajo D se programó para empezar al principio del día 2 y acabar a la mitad del día 9. Actualmente (momento de revisión después del día 4) va 2 días por delante de lo programado.
- El trabajo E debía empezar el día 1 y acabar el día 3. Marcha según el tiempo previsto.
- El trabajo F debía haber empezado el día 3, pero el mantenimiento hizo que se retrasara un día y medio. El trabajo debería tardar ahora cinco días enteros. Actualmente está dentro del programa.
- El trabajo G va un día retrasado con respecto al programa. Empezó al comienzo del día 2 y debe necesitar 6 días para completarse.

Elabore un diagrama Gantt de programación para First Printing & Copy Center.

• P **5.3.** La empresa Orange Top Cab tiene un taxi esperando en cada una de las cuatro paradas de taxi de Evanston, Illinois. Hay cuatro clientes que han llamado solicitando un taxi. Las distancias, en kilómetros, de los taxis que esperan hasta los clientes figuran en la siguiente tabla. Determine la asignación óptima de taxis a clientes para minimizar la distancia de conducción total hasta los consumidores.

	Consumidor			
Ubicación del taxi	**A**	**B**	**C**	**D**
Parada 1	7	3	4	8
Parada 2	5	4	6	5
Parada 3	6	7	9	6
Parada 4	8	6	7	4

• P **5.4.** La compañía de pruebas médicas Mary Meyer desea asignar una serie de trabajos a una serie de máquinas. La siguiente tabla proporciona los datos de producción de cada máquina cuando realiza un trabajo específico:

	Máquina			
Trabajo	**A**	**B**	**C**	**D**
1	7	9	8	10
2	10	9	7	16
3	11	5	9	6
4	9	11	5	8

a) Determine la asignación de trabajos a máquinas que *maximizará* la producción total.
b) ¿Cuál es la producción total de su asignación?

• P **5.5.** La empresa Johnny Ho Manufacturing Company de Columbus, Ohio, va a sacar al mercado cuatro nuevos componentes electrónicos. Cada una de las actuales fábricas de Ho tiene capacidad para añadir un producto más a su línea actual de componentes electrónicos. Los costes unitarios de fabricación de los componentes en las cuatro fábricas se muestran en la tabla adjunta. ¿Cómo debe asignar Ho los nuevos productos a las plantas para minimizar los costes de fabricación?

	Planta			
Componente electrónico	**1**	**2**	**3**	**4**
C53	0,10$	0,12$	0,13$	0,11$
C81	0,05	0,06	0,04	0,08
D5	0,32	0,40	0,31	0,30
D44	0,17	0,14	0,19	0,15

5.6. Laura Middleton, planificadora de una pequeña fábrica en Grand Rapids, Michigan, tiene seis trabajos que se pueden procesar en cualquiera de seis máquinas distintas, cuyos tiempos de proceso respectivos (en horas) se muestran a continuación. Determine la asignación de trabajos a máquinas que dé como resultado el mínimo tiempo total de producción.

	Máquina					
Trabajo	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
A-52	60	22	34	42	30	60
A-53	22	52	16	32	18	48
A-56	29	16	58	28	22	55
A-59	42	32	28	46	15	30
A-60	30	18	25	15	45	42
A-61	50	48	57	30	44	60

5.7. El departamento de policía de Akron tiene cinco equipos de investigación disponibles para asignar a cinco casos penales abiertos. El Comisario Jefe, Paul Kuzdrall, quiere asignar a los equipos de forma que se minimice el tiempo total para cerrar todos los casos. El número medio de días que cada equipo necesitará para completar cada caso, en función de casos anteriores, es el siguiente:

	Caso				
Equipo	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
1	14	7	3	7	27
2	20	7	12	6	30
3	10	3	4	5	21
4	8	12	7	12	21
5	13	25	24	26	8

Cada equipo está compuesto por distintos tipos de especialistas y, mientras que un equipo puede ser muy eficaz resolviendo determinado tipo de casos, puede ser practicamente inútil en otros.

a) Resuelva el problema utilizando el método de asignación.
b) Asigne los equipos a los casos anteriores, pero con la restricción de que el Equipo 5 no puede trabajar en el Caso E por un conflicto de intereses.

5.8. La empresa Gleaming Company acaba de desarrollar un nuevo líquido para lavar platos y está preparándose para una campaña de promoción nacional en televisión. La empresa ha decidido programar una serie de anuncios de un minuto durante las horas punta de au-

diencia de amas de casa, de una a cinco de la tarde. Para llegar a la mayor audiencia posible, Gleaming desea programar un anuncio en cada una de las cuatro cadenas nacionales, y colocar un anuncio durante cada uno de los cuatro bloques de hora. En la siguiente tabla se muestran los índices de exposición en cada hora, que representan el número de televidentes por cada 1.000 dólares gastados. ¿Qué cadena debería programarse en cada hora para proporcionar la máxima exposición de audiencia?

	Cadenas			
Hora	**A**	**B**	**C**	**Independiente**
1:00–2:00 P.M.	27,1	18,1	11,3	9,5
2:00–3:00 P.M.	18,9	15,5	17,1	10,6
3:00–4:00 P.M.	19,2	18,5	9,9	7,7
4:00–5:00 P.M.	11,5	21,4	16,8	12,8

5.9. James Gross, director del Departamento de Negocios de la Universidad de Oshkosh, tiene que asignar profesores a las asignaturas del próximo semestre. Como criterio para decidir quién tiene que dar cada asignatura, el profesor Gross revisa las evaluaciones de los profesores en los dos últimos años (hechas por los alumnos). Puesto que cada uno de los cuatro profesores ha impartido la docencia en cada una de las cuatro asignaturas en algún momento durante los dos últimos años, Gross puede asignar una puntuación a cada profesor en cada una de ellas. Estas puntuaciones figuran en la siguiente tabla.

a) Determine la asignación de profesores a asignaturas para lograr la máxima puntuación en la evaluación del profesorado.
b) Asigne los profesores a las asignaturas con la restricción de que el profesor Fisher no puede enseñar Estadística.

	Asignatura			
Profesor	**Estadística**	**Dirección**	**Finanzas**	**Economía**
W. W. Fisher	90	65	95	40
D. Golhar	70	60	80	75
Z. Hug	85	40	80	60
N. K. Rustagi	55	80	65	55

5.10. Los siguientes trabajos están esperando a ser procesados en una misma máquina. Los trabajos se registran según su llegada.

Trabajo	Fecha de entrega solicitada	Duración (días)
A	313	8
B	312	16
C	325	40
D	314	5
E	314	3

¿En qué secuencia serían ordenados los trabajos de acuerdo con las siguientes reglas de decisión: (1) FCFS, (2) EDD, (3) SPT, (4) LPT? Todas las fechas están especificadas en

días del calendario de planificación de fabricación. Suponga que todos los trabajos llegan el día 275. ¿Qué decisión es la mejor y por qué?

5.11. La Peluquería Jesse's del Aeropuerto O'Hare está abierta los 7 días de la semana, pero su demanda es variable. Jesse está interesado en tratar a sus peluqueros lo mejor posible, con un trabajo estable y, a ser posible, 5 días de trabajo con dos días libres consecutivos. Su análisis de sus necesidades de personal ha dado lugar al siguiente plan. Programe al personal de Jesse con el menor número posible de peluqueros.

	Día						
	Lunes	**Martes**	**Miércoles**	**Jueves**	**Viernes**	**Sábado**	**Domingo**
Peluqueros necesarios	6	5	5	5	6	4	3

5.12. Una maderera de Alabama tiene cuatro trabajos pendientes, como se muestra a continuación. Hoy es el día 205 en el programa de la maderera. Determine en qué secuencia se ordenarán los trabajos según las siguientes reglas de decisión:

a) FCFS
b) SPT
c) LPT
d) EDD
e) Índice crítico

¿Cuál es la mejor, y por qué? ¿Cuál supone el mínimo retraso?

Trabajo	Fecha de entrega deseada	Tiempo restante (en días)
A	212	6
B	209	3
C	208	3
D	210	8

5.13. Los siguientes trabajos están esperando a ser procesados en el taller mecánico de Rick Carlson. El taller de Carlson tiene un número de trabajos recibidos y aún no procesados (*backlog*) relativamente grande y establece nuevos programas cada dos semanas, sin afectar a programas anteriores. A continuación se muestran los trabajos recibidos durante las dos semanas anteriores. Se pueden programar a partir de hoy, que es el día 241 (el día 241 es día laborable). Los nombres de los trabajos hacen referencia a los nombres de los clientes y a los números de los contratos.

Trabajo	Fecha de llegada	Días de producción necesarios	Fecha de entrega solicitada
BR-02	228	15	300
CX-01	225	25	270
DE-05	230	35	320
RG-05	235	40	360
SY-11	231	30	310

a) Complete la siguiente tabla (muestre los cálculos que haya hecho).
b) ¿Qué regla de asignación tiene el mejor resultado en cuanto a tiempo del flujo?
c) ¿Qué regla de asignación tiene el mejor resultado en cuanto a utilización?
d) ¿Qué regla de asignación tiene el mejor resultado en cuanto a retrasos?
e) ¿Qué regla de asignación elegiría? Respalde su decisión.

Regla de asignación	Secuencia de trabajos	Tiempo de flujo	Utilización	Número medio de trabajos	Retraso medio
EDD					
SPT					
LPT					
FCFS					

: P **5.14.** Los siguientes trabajos están esperando a ser procesados en el taller de Julie Morel.

Trabajo	Fecha de llegada del pedido	Días de producción necesarios	Fecha de entrega solicitada del pedido
A	110	20	180
B	120	30	200
C	122	10	175
D	125	16	230
E	130	18	210

¿En qué secuencia serían colocados los trabajos de acuerdo con las siguientes reglas de decisión: (1) FCFS, (2) EDD, (3) SPT, (4) LPT? Todas las fechas se dan según días de calendario del taller. Hoy en el calendario de planificación es día 130 y todavía no se ha empezado o programado ninguno de los trabajos. ¿Cuál es la mejor regla?

: **5.15.** Dada la siguiente demanda de camareros y camareras en el restaurante Pentico's Bar & Grill, determine el mínimo número de personal con una política de dos días libres consecutivos.

	Día						
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Personal necesario	3	4	4	5	6	7	4

: P **5.16.** Los siguientes trabajos esperan a ser procesados en el taller de Jeremy LaMontagne. Hoy es el día 250.

Trabajo	Fecha de llegada del trabajo	Días de producción necesarios	Fecha de entrega solicitada del trabajo
1	215	30	260
2	220	20	290
3	225	40	300
4	240	50	320
5	250	20	340

Utilizando la regla de programación del índice crítico, ¿en qué secuencia deberían ser procesados los trabajos?

P **5.17.** Se tienen que procesar el siguiente grupo de siete trabajos a través de dos centros de trabajo en la imprenta de Jorge Heinrich. La secuencia es imprimir primero y encuadernar después. El tiempo de proceso en cada centro de trabajo figura en la tabla.

Trabajo	Impresión (horas)	Encuadernación (horas)
T	15	3
U	7	9
V	4	10
W	7	6
X	10	9
Y	4	5
Z	7	8

a) ¿Cuál es la secuencia óptima de realización de estos trabajos?
b) Represente gráficamente la realización de los trabajos en los dos centros.
c) ¿Cuál es la duración total de esta solución óptima?
d) ¿Cuál es el tiempo inactivo en el taller de encuadernación dada la solución óptima?

P **5.18.** Se van a procesar seis trabajos mediante una operación en dos etapas. La primera operación consiste en pulir y la segunda en pintar. Los tiempos del proceso son los siguientes:

Trabajo	1.ª operación (horas)	2.ª operación (horas)
A	10	5
B	7	4
C	5	7
D	3	8
E	2	6
F	4	3

Determine la secuencia que minimiza el tiempo total de finalización de estos trabajos. Ilústrelo gráficamente.

P **5.19.** Actualmente el equipo de astronautas de la NASA incluye a 10 especialistas en misiones, que tienen un doctorado, o bien en astrofísica, o bien en astromedicina. Uno de estos especialistas será asignado a cada uno de los 10 vuelos programados para los próximos 9 meses. Los especialistas de las misiones son responsables de llevar a cabo experimentos científicos o médicos en el espacio, o de lanzar, recuperar o reparar satélites. El jefe de personal de los astronautas, un antiguo miembro del equipo de astronautas con tres misiones de experiencia, debe decidir quién será asignado y entrenado para cada una de las diferentes misiones. Evidentemente, los astronautas con formación médica están más capacitados para las misiones que implican experimentos biológicos o médicos, mientras que los que tienen estudios orientados a ingeniería o a física están mejor capacitados para otro tipo de misiones. El jefe asigna a cada astronauta una calificación (del 1 al 10) para cada posible misión. El 10 significa que encaja perfectamente en la tarea y el 1 que no encaja. Sólo se

asigna un especialista para cada vuelo, y no se vuelve a asignar a nadie hasta que todos los demás hayan volado al menos una vez.

	Misión									
Astronauta	ENE 3	ENE 27	FEB 5	FEB 26	MAR 26	ABR 12	MAY 1	JUN 9	AGO 20	SEP 19
Chiang	9	7	2	1	10	9	8	9	2	6
Ittig	8	8	3	4	7	9	7	7	4	4
Malik	2	1	10	10	1	4	7	6	6	7
Moodie	4	4	10	9	9	9	1	2	3	4
Riddle	10	10	9	9	8	9	1	1	1	1
Sower	1	3	5	7	9	7	10	10	9	2
Sweeney	9	9	8	8	9	1	1	2	2	9
Temponi	3	2	7	6	4	3	9	7	7	9
Turner	5	4	5	9	10	10	5	4	9	8
Visich	10	10	9	7	6	7	5	4	8	8

a) ¿Quién debe ser asignado a cada vuelo?

b) Se nos acaba de informar que Malik se casará en febrero y que además se le ha concedido una muy deseada gira publicitaria por Europa en ese mes. (Quiere llevarse a su esposa y aprovechar también el viaje como luna de miel). ¿Cómo cambia esto el programa final?

c) Sweeney se ha quejado de que se le ha calificado mal para sus misiones de enero. La calificación debe ser de 10, le dice a su jefe, el cual está de acuerdo y vuelve a calcular el programa. ¿Hay alguna variación sobre el programa establecido en el apartado b)?

d) ¿Cuáles son los puntos fuertes y débiles de este enfoque de la programación?



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: 5.20 a 5.25.

■ *Caso de estudio* ■

Payroll Planning, Inc.

Payroll Planning es una empresa de Boulder, Colorado, que presta servicios de contabilidad a pequeñas empresas. Éstas dejan sus datos de nómina semanal, quincenal o mensualmente, o las envían electrónicamente por Internet. Payroll Planning procesa los datos y extiende los cheques. La principal empresa competidora es PayChex, Inc., de reconocido prestigio en todo el país. La siguiente tabla muestra los tiempos y el tipo de proceso de los trabajos enviados por los clientes de Payroll Planning el viernes, día 1 de mayo.

Cliente	Tipo de proceso	Tiempo (en minutos)
Allen Leather	Semanal	33
Art World	Quincenal	63
Beta Computing	Mensual	95

Cliente	Tipo de proceso	Tiempo (en minutos)
Colon Clinic	Mensual	87
Darrow Plumbing	Semanal	72
Denver Broncos	Semanal	15
Eden Roc Hotel	Mensual	26
Fink's Garage	Semanal	28
Golden Gloves	Semanal	47
Gunter's Guns	Semanal	32
Hug & Jordan	Semanal	24
Izenman Ads	Mensual	55
Jerry's Ice Cream	Semanal	31
Keystone Repairs	Semanal	33
Lifeblood, Inc.	Semanal	25
Lisa's Bakery	Semanal	48
Living Well	Quincenal	42
Mortician Supply Co.	Semanal	43
New Life Vitamins	Semanal	64
Owens & Marshal	Mensual	42
Philly Cheesedogs	Semanal	24
Quik Lube	Semanal	14
Rockin' Robin	Semanal	74
Sam's Sporting Goods	Mensual	110
Tennis n'More	Semanal	18
Tetris, Inc.	Semanal	13
Twins Emporium	Semanal	22
Valvoline Electric	Semanal	23
White's Dry Cleaner	Quincenal	64
Wilson & Jones	Mensual	88
Wings of S. F.	Semanal	8
Woodworth Auto	Mensual	76
Z.A.G. Inc.	Semanal	36
Zuesman Gym	Semanal	42

Cuando las empresas dejan o transmiten electrónicamente sus datos a tiempo, Payroll Planning logra normalmente tener los cheques impresos también a tiempo. Pero Payroll Planning ha tenido ocasionalmente dificultades de programación. La empresa piensa que el estudio de lo que ha ocurrido en el pasado puede arrojar alguna luz sobre cómo tratar situaciones parecidas en el futuro.

Payroll Planning fija fechas de entrega según el tipo de cliente. Para los clientes mensuales, la hora de entrega son las nueve de la mañana. Para los quincenales, la hora es a mediodía; y para los semanales, la hora de entrega es las tres de la tarde. Todo el proceso empezará en el tercer turno (a medianoche) del día en que se deben entregar las nóminas.

Payroll Planning ha venido utilizando la regla de programación de la "fecha de entrega más temprana", porque da mayor prioridad a los clientes mensuales, y la más baja a los semanales. Si los clientes vienen sólo una vez al mes hay menor posibilidad de error (retraso) que si emplean una nómina semanal. A pesar de que Payroll Planning ha venido siguiendo esta lógica durante los últimos diez años, quiere decidir si ésta es la mejor regla de programación.

Pregunta para el debate

1. Estudie posibles alternativas de programación para Payroll Planning.

Fuente: Reimpreso con permiso de los profesores Howard J. Weiss y Mark E. Gershon, Universidad de Temple.



Caso de estudio en vídeo

La programación en Hard Rock Café

Independientemente de que se tenga que definir los horarios de las enfermeras en la Clínica Mayo, de los pilotos de Southwest Airlines, de las aulas en la UCLA, o de los camareros en Hard Rock Café, es evidente que es importante disponer de un buen sistema de programación. Los buenos programas utilizan los activos de una organización (1) de forma más eficaz, atendiendo puntualmente a los consumidores, y (2) más eficientemente, reduciendo los costes.

Hard Rock Café en Universal Studios, Orlando, es el restaurante más grande del mundo, con 1.100 asientos para comensales en dos pisos. Con una rotación habitual de empleados en la industria de los restaurantes del 80 al 100 por ciento al año, el director general de Hard Rock, Ken Hoffman, se toma muy en serio la programación. Hoffman quiere que sus 160 empleados

sean eficaces, pero también quiere tratarlos bien. Lo consigue con un software de programación y una flexibilidad que permite aumentar la productividad al mismo tiempo que contribuye a que la rotación de sus empleados sea la mitad que la de la industria. Su objetivo consiste en encontrar un muy buen equilibrio que permita que sus empleados tengan turnos de trabajo diarios productivos financieramente al mismo tiempo que se fija un horario suficientemente ajustado para que no haya exceso de personal entre la hora de la comida y la de la cena.

El horario semanal se empieza a programar a partir de la previsión de ventas. "Primero analizamos las ventas en el café para el mismo día de la misma semana del año pasado –dice Hoffman–. Después ajustamos nuestra previsión para este año a partir de diversos factores de los que hacemos un seguimiento muy próximo. Por ejemplo, llamamos todas las semanas a la Oficina de Convenciones de Orlando para ver qué grandes grupos van a acudir a la ciudad. Después enviamos a dos analistas para que comprueben los niveles de ocupación en los hoteles de la zona. Examinamos detenidamente los conciertos programados en la sala Hard Rock Live, una sala de conciertos de 3.000 plazas situada al lado del restaurante. A partir de la previsión, calculamos cuántos empleados necesitamos cada día en cocina, bar, recepcionistas y camareros del restaurante".

Una vez que Hard Rock Café ha determinado cuántos empleados necesita, los empleados presentan los formularios de solicitud, que se introducen en el software de programación matemática lineal. Los individuos son catalogados en función de la prioridad que se les asigna, entre 1 y 9, basada en la antigüedad y en su posibilidad para ocupar las vacantes de cada día. Entonces se publican los horarios por día y estación de trabajo. Los empleados pueden hacer cambios entre sí, teniendo en cuenta el valor de cada turno y de cada estación de trabajo.

A los empleados de Hard Rock les gusta el sistema, al igual que al director general, puesto que las ventas por hora de trabajo están aumentando y la rotación de trabajadores disminuye.

Preguntas para el debate*

1. Nombre y justifique varios factores que podría utilizar Hoffman para prever las ventas semanales.
2. ¿Qué se puede hacer para reducir la rotación de trabajadores en los grandes restaurantes?
3. ¿Por qué es importante la antigüedad en el sistema de programación de los empleados?
4. ¿Cómo influye la programación en la productividad?

* Puede que quiera ver este caso de estudio en su CD-ROM antes de responder a las preguntas.

Fuentes: Profesores Barry Render (Rollins College), Jay Heizer (Texas Lutheran University) y Beverly Amer (Northern Arizona University).

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Visite nuestra página personal www.prenhall.com/heizer para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Old Oregon Wood Store:** Este caso requiere encontrar la mejor asignación de trabajadores para la tarea de fabricar mesas.

Harvard ha seleccionado estos casos de la Harvard Business School para acompañar este capítulo (textbookcasematch.hbsp.harvard.edu):

- **El modelo de atención al paciente del hospital general de Massachusetts** (#699-154): Analiza la implementación de un nuevo modelo de atención al paciente.
- **Southern Pulp and Paper** (#696-103): Describe una fábrica de papel en la que la mala programación de las máquinas crea un cuello de botella en las operaciones.



BIBLIOGRAFÍA

Bolander, Steven F., y Sam G. Taylor. "Scheduling Techniques: A Comparison of Logic". *Production and Inventory Management Journal* (tercer trimestre 2000): pp. 1-5.

Boone, Tonya, Ram Ganesahn, Yuanming Guo, y J. Keith Ord. "The Impact of Imperfect Processes on Production Run Times". *Decision Sciences* 31, n.º 4 (otoño 2000): pp. 773-787.

Cayirli, Tugba, y Emre Veral. "Outpatient Scheduling in Health Care: A Review of Literature". *Production and Operations Management* 12, n.º 4 (invierno 2003): pp. 519-549.

Cheng, T. C. Edwin, Jatinder N. D. Gupta, y Guoqing Wang. "A Review of Flowshop Scheduling Research with Setup Times". *Production and Operations Management* 9, n.º 3 (otoño 2000): pp. 262-282.

Davis, Darwin J., y Vincent A. Mabert. "Order Dispatching and Labor Assignment in Cellular Manufacturing Systems". *Decision Sciences* 31, n.º 4 (otoño 2000): pp. 745-771.

Haksever, C., B. Render, y R. Russell. *Service Management and Operations*, 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2000).

Lesaint, David, Christos Voudouris, y Nader Azarmi. "Dynamic Workforce Scheduling for British Telecommunications Plc". *Interfaces* 30, n.º 1 (enero-febrero 2000): pp. 45-56.

Leung, Joseph Y. T. *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models, and Performance Analysis*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press (2004).

Mabin, V. S., y S. J. Balderstone. "The Performance of the Theory of Constraints Methodology: Analysis and Discussion of Successful TOC Applications". *International Journal of Operations and Production Management*, 23, n.º 5-6 (2003): pp. 508-596.

Mahoney, R. Michael, y George W. Plossl. *High-Mix Low-Volume Manufacturing*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR (1997).

Mondschein, Susana V., y Gabriel Y. Weintraub. "Appointment Policies in Service Operations: A Critical Analysis of the Economic Framework". *Production and Operations Management* 12, n.º 2 (verano 2003): pp. 266-286.

Morton, Thomas E., y David W. Pentico. *Heuristic Scheduling Systems*. New York: John Wiley (1993).

Olson, John R., y Marc J. Schniederjans. "A Heuristic Scheduling System for Ceramic Industrial Coatings". *Interfaces* 30, n.º 5 (septiembre-octubre 2000).

Pinedo, M., y X. Chao. *Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services*. New York: McGraw-Hill/Irwin (1999).

Plenert, Gerhard, y Bill Kirchmier. *Finite Capacity Scheduling*. New York: John Wiley (2000).

Render, B., R. M. Stair, y M. Hanna. *Quantitative Analysis for Management*, 9.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Schaefers, J., R. Aggoune, F. Becker, y R. Fabbri. "TOC Based Planning and Scheduling Model". *International Journal of Operations and Production Management* 42, n.º 13 (julio 2004): 2639.



RECURSOS EN INTERNET

CMS Software:
www.cmssoftware.com

JRG Software, Inc. Factory Scheduler:
www.jrgsoftware.com

Production Scheduling:
www.production-scheduling.com

ILOG Model Development:
www.ilog.com

Finite Scheduling Demo:
www.stern.nyu.edu/omsoftware/lekin

Finite Scheduling Software:
www.asprova.com

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN JUSTO A TIEMPO Y DE PRODUCCIÓN AJUSTADA

6

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando haya completado este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Variabilidad
- Kanban
- Sistema 5 S
- Siete desperdicios

Describir o explicar:

- La filosofía justo a tiempo
- Los sistemas de tirar o arrastrar (*pull*)
- Los sistemas de empujar (*push*)
- Los objetivos de las asociaciones JIT
- La producción ajustada (*lean*)
- Los principios del sistema de producción de Toyota

PERFIL DE UNA EMPRESA GLOBAL: GREEN GEAR CYCLING

El sistema justo a tiempo (JIT) proporciona una ventaja competitiva a Green Gear

Green Gear ha integrado cuidadosamente la fabricación justo a tiempo y la mejora continua en su cultura y en sus procesos. El inventario se encuentra en contenedores individuales en su lugar de utilización. Cada contenedor está etiquetado e incluye un kanban para desencadenar el reabastecimiento.

Las células de trabajo hacen una amplia utilización de las señales visuales y un etiquetaje explícito de todo el inventario, herramientas y equipos. Cada artículo se guarda en una localización concreta, lo que facilita la polivalencia en formación y en asignación de los empleados a las diversas celdas. El diseño eficaz de la célula de trabajo se traduce en un inventario reducido con un stock de trabajo en curso de una bicicleta por célula de trabajo.

Cada Bike Friday (Bicicleta Viernes) se construye personalizada contra pedido, a partir de 14 modelos básicos, con un total de 67 listas preconfiguradas, múltiples colores de pintura, y opciones de tamaño adicionales. El número total de posibles combinaciones distintas de Bicicletas Viernes excede de 211.000. Pero el tamaño del lote es de una unidad. Y cabe en un maletín.

Green Gear Cycling, Inc., de Eugene, Oregon, diseña y fabrica bicicletas de paseo de alto rendimiento, conocidas como Bike Friday (Bicicleta Viernes). El nombre proviene del "hombre Viernes" de Robinson Crusoe, que siempre estaba ahí cuando se lo necesitaba. Bike Friday es una bicicleta en una maleta, siempre allí cuando se la necesita. Esta línea exclusiva de bicicletas que se doblan y caben en una maleta se construye bajo pedido. El objetivo de Green Gear, desde su inicio en 1992, ha sido producir rápida y económicamente bicicletas personalizadas de alta calidad. Este objetivo sugería una estrategia de personalización en masa que requería una rápida producción, un reducido inventario, células de trabajo y supresión de las preparaciones de máquina. También significaba que había que adoptar las mejores prácticas de la dirección de operaciones con un gran enfoque hacia el justo a tiempo y la gestión de la cadena de suministros.

Mediante la colaboración con los proveedores Green Gear ha desarrollado e implementado las entregas justo a tiempo que contribuyen a mantener un nivel de inventario mínimo. Y, al almacenar los inventarios en el punto de utilización, y desarrollar agresivamente sistemas internos que respaldan el reabastecimiento en pequeñas cantidades, la empresa ha sido capaz de reducir el nivel de inventarios y aumentar el nivel de calidad. Este éxito con el JIT juega un papel decisivo en permitir que funcione bien el sistema de inventarios reducidos y elevada calidad de Green Gear. Estos sistemas son conocidos como sistemas *kanban* y suelen utilizar una sencilla señal, como una tarjeta, en vez de un pedido formal, para indicar que se necesitan más componentes.

Por razones competitivas y de eficiencia, los directivos de Green Gear quieren mantener un tiempo de producción total, desde los tubos sin pulir hasta la bicicleta acabada, inferior a un día. Un layout de fabricación con un rendimiento total tan elevado requiere minimizar o eliminar las preparaciones de maquinaria. El resultado son dos líneas de flujo, una para las bicicletas tándem (con dos asientos) y otra para las bicicletas sencillas. Las siete células de trabajo de estas dos líneas son alimentadas con componentes desde tres células de apoyo. Las tres células de respaldo suministran submontajes, pintura en polvo y ruedas. Reciben pedidos mediante tarjetas *kanban*. El tiempo de producción de cada célula está equilibrado para ajustarse al de las otras. Estas células de trabajo bien diseñadas contribuyen a una rápida producción en Green Gear, con poco trabajo en curso.

Cada bicicleta se construye a tamaño personalizado, configurada para cada cliente y se envía inmediatamente en cuanto se termina de producir. Así, este sistema JIT de producción bajo pedido requiere poco inventario de materia prima y de trabajo en curso, y *ningún* inventario de producto acabado. La colaboración con los proveedores, las células de trabajo creativas, la eliminación de las preparaciones y la excepcional calidad contribuyen al reducido inventario y ayudan a Green Gear en su permanente esfuerzo de acelerar la producción de bicicletas en la planta con un tamaño de lote unitario.

Como se ha mostrado en el *Perfil de una empresa global*, el justo a tiempo (JIT) contribuye a unas operaciones eficientes en Green Gear Cycling. En este capítulo vamos a analizar el sistema JIT como una filosofía de mejora continua que elimina el desperdicio y respalda a las organizaciones ajustadas o enjutas (*lean*).

DIEZ DECISIONES ESTRATÉGICAS DE DIRECCIÓN DE OPERACIONES

- Diseño de bienes y servicios
- Gestión de la calidad
- Estrategia de proceso
- Estrategias de localización
- Estrategias de layout
- Recursos humanos
- Dirección de la cadena de suministros
- **Gestión del inventario**
  - Demanda independiente
  - Demanda dependiente
  - **JIT y producción ajustada**
- Programación
- Mantenimiento

JUSTO A TIEMPO Y PRODUCCIÓN AJUSTADA (*LEAN*)

Justo a tiempo (JIT) es una filosofía de resolución continua y forzada de los problemas que respalda la producción ajustada. La **producción ajustada** proporciona al consumidor exactamente lo que éste quiere en el momento en que lo quiere, sin desperdicios, mediante mejora continua. La producción ajustada está conducida por el "tirón o arrastre" ejercido por el pedido del cliente. JIT es un ingrediente clave de la producción ajustada. Cuando se pone en práctica como una estrategia de fabricación integral, JIT y la producción ajustada sostienen la ventaja competitiva y tienen como resultado mayores rendimientos totales[1].

Justo a tiempo (JIT) Una filosofía de resolución continua y obligada de problemas que elimina los desperdicios.

Producción ajustada o enjuta Una forma de eliminar los desperdicios enfocándose en lo que quiere exactamente el consumidor.

Con JIT se "tira o arrastra" de los componentes y suministros a través de un sistema de producción para que lleguen *donde* se necesitan *cuando* se necesitan. Cuando las unidades correctas no llegan justo cuando son necesarias, se ha identificado un "problema". Esto convierte al JIT en una excelente herramienta para ayudar a los directores de operaciones a añadir valor eliminando desperdicios y variabilidades indeseadas. Como en un sistema JIT no hay inventario ni tiempo sobrante, los costes asociados al inventario innecesario se eliminan, y se mejora el rendimiento total de la producción. Por consiguiente, los beneficios del JIT son especialmente eficaces en respaldar estrategias de respuesta rápida y de bajo coste.

Como la eliminación de *desperdicios* y de *variabilidad* y el concepto de "*tirar o arrastrar" de los materiales* son fundamentales en el sistema JIT, los comentaremos brevemente en esta sección. Después introducimos aplicaciones del JIT en proveedores, layout, inventario, programación, calidad y potenciación de los empleados. Posteriormente revisaremos algunas de las características distintivas de la producción ajustada y nos fijaremos en cómo se aplica el JIT en los servicios.

Reducción de desperdicios Cuando hablamos de desperdicios en la producción de bienes o servicios, nos referimos a *cualquier cosa que no añade valor*. Los productos *almacenados*, *en proceso de inspección* o que llegan con *retraso*, los productos *esperando en las colas* y los *productos defectuosos* no añaden valor; son 100 por ciento desperdicio. Además, cualquier actividad que no añade valor a un producto desde la *perspectiva del cliente* es un desperdicio. El JIT proporciona entregas más rápidas, reduce el trabajo en curso y acelera la producción, todo lo cual reduce el desperdicio. Además, dado que el JIT reduce el trabajo en curso, da poca opción a que se produzcan errores, poniendo mayor énfasis en una producción de calidad. Estos esfuerzos en la reducción de desperdicios liberan activos del inventario para otros usos más productivos. El JIT expulsa los desperdicios fuera del sistema.

Reducción de la variabilidad Para conseguir el movimiento de materiales justo a tiempo, los directivos reducen la *variabilidad causada tanto por factores internos como exter-*

[1] La investigación indica que cuanto más completo en alcance y profundidad sea el JIT, mayores serán los rendimientos globales de la empresa. *Véase* Rosemary R. Fullerton y Cheryl S. McWatters, "The Production Performance Benefits from JIT Implementation", *Journal of Operations Management* 19, n.º 1 (enero de 2001): pp. 81-96.

Variabilidad
Cualquier desviación del proceso óptimo que entrega productos perfectos a tiempo, siempre.

nos. La **variabilidad** es cualquier desviación del proceso óptimo que entrega productos perfectos, a tiempo y siempre. El inventario oculta la variabilidad, una palabra políticamente correcta para definir los problemas. Cuanta menos variabilidad haya en el sistema, menos desperdicio habrá. La mayor parte de la variabilidad es consecuencia de tolerar desperdicios o de una gestión deficiente. La variabilidad se produce porque:

1. Los empleados, las máquinas y los proveedores producen unidades que no cumplen las normas, llegan tarde o no llegan en cantidad adecuada.
2. Los planos de ingeniería o las especificaciones son inexactos.
3. El personal de producción intenta producir antes de que los planos o las especificaciones estén terminadas.
4. No se conocen las demandas de los clientes.

La variabilidad puede pasar desapercibida cuando hay inventario. Por eso es tan eficaz el JIT. La filosofía JIT de mejora continua elimina la variabilidad. La eliminación de la variabilidad nos permite mover los materiales adecuados justo a tiempo para su utilización. El JIT reduce el material en la cadena de suministros. Nos ayuda a concentrarnos en añadir valor en cada paso. La Tabla 6.1 resume las aportaciones del JIT; comentaremos estos conceptos en este capítulo.

Sistema de tirar o arrastrar *(pull)*
Concepto JIT que tiene como resultado el que el material sólo se produce cuando se solicita y se traslada allí a donde hace falta y justo cuando hace falta.

Comparación entre la estrategia de tirar o arrastrar (*pull*) y la estrategia de empujar (*push*) El concepto sobre el que se basa el JIT es el de un **sistema de tirar o arrastrar (*pull*)**: un sistema que *tira o arrastra* de una unidad hacia donde es necesaria justo cuando hace falta. Un sistema de tirar o arrastrar utiliza señales para solicitar producción y entrega de material a las estaciones situadas por encima (anteriormente en el proceso productivo) de la estación que tiene capacidad de producción disponible. El concepto de tirar o arrastrar de la producción se utiliza tanto en el proceso de producción propiamente dicho como con los proveedores. Al *tirar o arrastrar* del material a lo largo del sistema en lotes muy pequeños conforme van haciendo falta, el "colchón" de inventario que esconde los problemas se elimina, los problemas se hacen evidentes y se pone énfasis en la mejora continua. Al suprimir el "colchón" del inventario, también se reduce la inversión en inventario y el tiempo ciclo de fabricación.

Tiempo de ciclo de fabricación
Tiempo transcurrido desde la llegada de las materias primas hasta la salida de los productos terminados.

El tiempo ciclo de fabricación es el tiempo que transcurre desde la llegada de las materias primas hasta la salida de los productos terminados. Por ejemplo, en Northern Telecom, fabricante de sistemas de telefonía, los materiales son "tirados o arrastrados" desde proveedores calificados hasta la línea de montaje. Gracias a este procedimiento se ha conseguido reducir la parte de recepción del tiempo ciclo de fabricación de 3 semanas a sólo 4 horas, el personal de inspección de recepción de materiales ha pasado de 47 personas a solamente 24 y los problemas en el taller debidos a materiales defectuosos han disminuido en un 97 por ciento.

Sistema de empujar (*push*)
Sistema que "empuja" los materiales hacia estaciones posteriores independientemente de si es oportuno o de la disponibilidad de recursos para realizar el trabajo.

Muchas empresas todavía mueven sus materiales en sus instalaciones siguiendo un modelo de "empujar" (*push*). Un **sistema de empujar** entrega órdenes a la siguiente estación de trabajo independientemente de si es oportuno y de la disponibilidad de recursos para trabajar con ese material. Los sistemas de empuje son la antítesis del JIT.

PROVEEDORES

Los materiales que se reciben se retrasan a menudo en los consignadores, durante el transporte, en los departamentos de recepción de la propia instalación y en la inspección de entrada. De manera análoga, los productos acabados a menudo se almacenan o guardan en

TABLA 6.1 ■ El sistema JIT ayuda a obtener ventajas competitivas

EL JIT NECESITA:

Proveedores:	Número de proveedores reducido; relaciones de apoyo con el proveedor; entregas de calidad a tiempo
Layout:	Layout de células de trabajo con comprobaciones en cada etapa del proceso; tecnología de grupo; maquinaria móvil, cambiable y flexible; alto nivel de organización y limpieza en los puestos de trabajo; reducido espacio para inventario; entrega directa a las zonas de trabajo
Inventario:	Tamaño de los lotes pequeños; poco tiempo de preparación; recipientes especializados para contener un número establecido de piezas
Programación:	Desviación cero de la programación; programas equilibrados; proveedores informados de los programas; técnicas *kanban*
Mantenimiento preventivo:	Programado; rutina diaria; involucración de los operarios
Calidad de la producción:	Control estadístico de procesos; proveedores de calidad; calidad dentro de la empresa
Potenciación de los empleados:	Empleados potenciados con delegación de decisión y con formación multifuncional; apoyo en la formación; pocas clasificaciones de los puestos de trabajo para garantizar la flexibilidad de la mano de obra
Compromiso:	Apoyo de la dirección, empleados y proveedores

QUE DERIVA EN:

La reducción de las colas y de las esperas acelera la producción, libera activos y consigue pedidos

La mejora de la calidad reduce los desperdicios y consigue pedidos

La reducción de los costes aumenta el margen o reduce el precio de venta

La reducción de la variabilidad en los puestos de trabajo reduce los desperdicios y consigue pedidos

La reducción de la repetición de los trabajos reduce los desperdicios y consigue pedidos

LO QUE GENERA:

Respuesta más rápida al cliente a costes más reducidos y con mayor calidad

Una ventaja competitiva

almacenes antes de ser remitidos a los distribuidores o a los clientes. Como el mantenimiento de artículos en inventario es un desperdicio, las asociaciones JIT tienen como objetivo, entre otros, reducir estos desperdicios.

Las **asociaciones JIT** existen cuando el proveedor y el comprador trabajan juntos con el objetivo común de eliminar desperdicios y reducir los costes. Estas asociaciones son esenciales para que funcione el sistema JIT. Durante todo el tiempo en el que se poseen los materiales, éstos deben someterse a algún proceso que añada valor. Para garantizar que esto es así, Xerox, como otras organizaciones líderes, considera al proveedor como una extensión de su propia organización. Por este motivo, el personal de Xerox espera que los proveedores estén tan comprometidos en la obtención de mejoras como la propia Xerox.

Asociaciones JIT
Asociaciones de proveedores y compradores que eliminan desperdicios y reducen los costes en beneficio mutuo.

TABLA 6.2 ■ Características de las asociaciones JIT

Proveedores

Pocos proveedores
Proveedores localizados en las proximidades
Se repiten negocio con los mismos proveedores
Ayuda a los proveedores para que se hagan o sigan siendo competitivos en precios
La licitación competitiva se limita principalmente a los nuevos compradores
El comprador es reacio a la integración vertical y a la posterior eliminación del negocio del proveedor
Se anima a los proveedores JIT a utilizar ellos también la filosofía JIT en sus compras a su segundo y tercer nivel de proveedores

Cantidades

Se comparten las previsiones sobre la demanda
Frecuentes entregas en lotes de pequeñas cantidades
Contratos a largo plazo
Mínimo papeleo para lanzar pedidos (utilización de Internet o de sistemas de intercambio electrónico de datos: EDI)
Poca o ninguna tolerancia de variación de las cantidades a entregar (en más o menos)
Los proveedores embalan en cantidades exactas
Los proveedores reducen el tamaño de sus lotes de producción

Calidad

Mínimas especificaciones de producto impuestas al proveedor
Colaboración con los proveedores para ayudarlos a cumplir los requisitos de calidad
Estrecha colaboración entre el personal de aseguramiento de la calidad del comprador y del proveedor
Los proveedores utilizan sistemas *poka-yoke* y gráficos de control de procesos

Envíos

Programación de las mercancías que llegarán
Aumentar el control mediante la utilización de compañías propias o contratadas para el transporte y el almacenamiento
Utilización de notificaciones anticipadas de envíos (ASN)

Para conseguir que funcione el JIT, el agente de compras debe comunicar el objetivo de la empresa al proveedor, explicando las necesidades de entrega, envasado, tamaño de los lotes, calidad, etcétera.

Muchos servicios han adoptado técnicas JIT como una parte habitual de su negocio. La mayor parte de los restaurantes, y desde luego, todos los restaurantes de lujo, esperan y reciben suministros JIT. Tanto el comprador como el proveedor cuentan con que los productos frescos, y de alta calidad, se entregarán sin falta, justo cuando son necesarios. El sistema no puede funcionar de otra manera.

Esta relación exige un alto grado de transparencia tanto por parte del proveedor como del comprador. La Tabla 6.2 muestra las principales características de las asociaciones JIT.

Objetivos de las asociaciones JIT

Los cuatro objetivos de las asociaciones JIT son:

1. *Supresión de las actividades innecesarias.* Por ejemplo, con buenos proveedores, las actividades de recepción y de inspección de entrada no son necesarias en un entorno JIT.
2. *Supresión del inventario en la planta de producción.* El sistema JIT entrega el material en el lugar y en el momento en que se necesita. Sólo hace falta inventario de materias primas si hay alguna razón para creer que los proveedores no son fiables. Asimismo, las piezas o componentes se deben entregar en pequeños lotes directamente al departamento que los utiliza, conforme vayan haciendo falta.

3. *Supresión del inventario en tránsito.* La empresa General Motors estimó que, en un momento dado cualquiera, más de la mitad de su inventario estaba en tránsito. Los departamentos de compras modernos ahora tratan de reducir el inventario en tránsito animando a los proveedores, y a los que aspiran a serlo, a establecerse cerca de sus instalaciones y a realizar envíos pequeños y frecuentes. Cuanto menor sea el flujo de material en la "tubería" de aprovisionamiento, menos inventario habrá. También se puede reducir el inventario mediante una técnica denominada *consignación*. El **inventario en consignación o en consigna** (véase el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "Producción ajustada en Cessna Aircraft"), una variante del sistema de inventario gestionado por el proveedor (Capítulo 1), significa que el proveedor mantiene la titularidad del inventario hasta el momento de su utilización. Por ejemplo, una planta de montaje puede encontrar un proveedor de ferretería que esté dispuesto a instalar su almacén en el lugar donde el usuario tiene actualmente su área de almacenamiento. De este modo, cuando se necesita material de ferretería, éste no se encuentra más lejos de lo que está el área actual de almacenamiento, y si lo desea, el proveedor puede enviar material a otros clientes, quizás de menores dimensiones, desde el "almacén".
4. *Eliminación de proveedores poco eficientes.* Cuando una empresa reduce el número de proveedores, aumenta sus compromisos a largo plazo. Para conseguir mejor calidad y fiabilidad, proveedores y compradores deben entenderse y confiar el uno en el otro. Para conseguir que las entregas de material se produzcan sólo cuando son necesarias y en las cantidades necesarias, hace falta además una *calidad perfecta*, también conocida como *defectos cero*. Por supuesto, *tanto* el proveedor *como* el sistema de entrega tienen que ser excelentes.

Inventario en consignación o consigna
Un acuerdo por el que el proveedor mantiene la titularidad del inventario hasta el momento de su utilización.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

PRODUCCIÓN AJUSTADA EN CESSNA AIRCRAFT

Cuando Cessna Aircraft abrió su nueva planta en Independence, Kansas, vio la oportunidad de pasar de una mentalidad artesanal con la que fabricaba pequeños aeroplanos de un solo motor a un sistema de producción ajustada o enjuta. Haciéndolo, Cessna adoptó tres prácticas de fabricación ajustada.

En primer lugar, Cessna estableció inventarios en consignación y gestionados por el proveedor con varios de sus proveedores. Por ejemplo, Honeywell mantiene *in situ* un suministro de componentes de aviones para 30 días. Se animó a otros proveedores a utilizar un almacén cercano en el que almacenar sus componentes que entonces podrían ser entregados diariamente a la línea de producción.

En segundo lugar los directivos de Cessna se comprometieron con una filosofía de multiformación en la que los miembros de un equipo aprenden a realizar las tareas de los miembros de otros equipos y pueden cambiar sus puestos en las cadenas de montaje según sea necesario. Para desarrollar estas habilidades técnicas, Cessna contrató a trabajadores jubilados de la cadena de montaje para ejercer de mentores y enseñar a los nuevos empleados. Se enseñó a los empleados a trabajar como un equipo y a asumir la responsabilidad de la calidad de su equipo.

En tercer lugar, la empresa utilizó tecnología de grupo (*véase* el Capítulo 5 del volumen *Decisiones Estratégicas*) y células de fabricación (Capítulo 9 de *Decisiones Estratégicas*) para dejar el sistema de procesos por lotes que tenía como consecuencia grandes inventarios y aviones sin vender. Ahora, Cessna "tira" del producto a través de su planta sólo cuando recibe un pedido.

Estos compromisos a largo plazo para la eficiencia productiva forman parte de un sistema de producción ajustada que ha convertido a Cessna en la líder de la industria, con casi la mitad del mercado de aviones de aviación general.

Fuentes: Purchasing (4 de septiembre de 2003): 25-30 y (6 de junio de 2002): 31-31; y *Fortune* (1 de mayo de 2000): 1222B-1222Z.

Inquietudes de los proveedores

Para establecer asociaciones JIT hay que prestar atención a diferentes inquietudes de los proveedores. Las cuestiones que preocupan a los proveedores son:

1. *Deseo de diversificación.* Muchos proveedores no quieren atarse con contratos a largo plazo con un cliente. La percepción de los proveedores es que reducen su riesgo si tienen muchos clientes.
2. *Programación deficiente del cliente.* Muchos proveedores tienen poca fe en la capacidad del comprador para reducir sus pedidos y conseguir una programación alisada y coordinada.
3. *Cambios de ingeniería.* Frecuentes cambios de ingeniería, con plazos inadecuados para que los proveedores ajusten su maquinaria y sus procesos, trastocan el sistema JIT.
4. *Aseguramiento de la calidad.* Muchos proveedores no consideran realista la producción con cero defectos.
5. *Lotes de pequeño tamaño.* Los proveedores a menudo tienen diseñados sus procesos para producir grandes lotes y consideran que la entrega al cliente en pequeños lotes es una forma de transferir los costes de almacenamiento a los proveedores.
6. *Proximidad.* Dependiendo de la localización del cliente, la entrega frecuente de mercancías en pequeños lotes puede ser vista como económicamente prohibitiva.

Para los que siguen siendo escépticos sobre las asociaciones JIT, podemos señalar que casi todos los restaurantes del mundo practican este sistema sin que haga falta contar con grandes cantidades de personal. Muchos restaurantes hacen pedidos de alimentos a última hora de la noche para que se los sirvan a primera hora del día siguiente. Piden sólo *lo que necesitan*, para que unos proveedores fiables se lo sirvan *cuando lo necesitan*.

TABLA 6.3 ■ Tácticas de layout

- Construir células de trabajo para familias de productos
- Incluir un gran número de operaciones en un área pequeña
- Minimizar las distancias
- Diseñar poco espacio para el inventario
- Mejorar la comunicación entre los empleados
- Utilizar dispositivos *poka-yoke*
- Construir equipos flexibles o móviles
- Formar a los empleados en el desempeño de varias funciones para aumentar la flexibilidad

LAYOUT JIT

Los layouts JIT reducen otro tipo de desperdicio, el movimiento. El movimiento de los materiales en los talleres (o de papel en las oficinas) no añade valor. Por consiguiente, queremos layouts flexibles que reduzcan el movimiento tanto de materiales como de personas. Los layouts JIT mueven el material directamente a donde se necesita. Por ejemplo, una línea de montaje debe diseñarse con puntos de entrega próximos a la línea de manera que no haya que entregar primero el material a un departamento de recepción en otro lugar de la planta, y luego haya que moverlo de nuevo. Eso es lo que hizo la División Wrangler de la VF Corporation en Greensboro, Carolina del Norte. Ahora, el tejido para los pantalones vaqueros se entrega directamente a la línea de producción. Cuando un layout reduce distancia, la empresa ahorra también espacio y elimina áreas potenciales en las que se pueda almacenar inventario no deseado. La Tabla 6.3 presenta una lista de tácticas para diseñar layouts.

Reducción de distancias

La reducción de las distancias es una importante aportación de las células de trabajo, de los centros de trabajo y de las fábricas enfocadas (*véase* el Capítulo 9 del volumen *Decisiones Estratégicas*). Los días de las largas cadenas de producción y de enormes lotes económicos, con mercancías que pasan a lo largo de monumentales máquinas que realizaban una sola operación, se han acabado. Ahora las empresas utilizan células de trabajo, a

menudo diseñadas en forma de U, que contienen varias máquinas que realizan diferentes operaciones. Estas células se basan muchas veces en códigos de tecnología de grupo (como se describe en el Capítulo 5 del volumen *Decisiones Estratégicas*). Los códigos de tecnología de grupo nos ayudan a identificar componentes con características similares de forma que los podemos agrupar en familias. Una vez que se han identificado las familias, se construyen las células de trabajo para elaborar los componentes similares que forman esas familias. El resultado puede considerarse como una pequeña instalación orientada al producto, en la que el "producto" es en realidad un grupo de productos similares: una familia de productos. Las células producen los artículos de uno en uno, e idealmente *sólo* producen las unidades después de que un cliente las ha pedido.

Mayor flexibilidad

Las células de trabajo modernas están diseñadas para que puedan adaptarse fácilmente a cambios en el volumen de producción, en mejoras de los productos, o incluso a nuevos diseños. No hay casi nada fijo en estos nuevos departamentos. Este mismo concepto de flexibilidad en el layout se aplica en las oficinas. No sólo es móvil la mayor parte del mobiliario y del equipamiento de la oficina, sino que también son movibles las paredes, las conexiones de las computadoras y las telecomunicaciones. El equipamiento es modular. La flexibilidad en el layout facilita los cambios que resultan de las mejoras de los productos *y* de los procesos, que son inevitables si se sigue una filosofía de mejora continua.

Impacto en los empleados

Los empleados que trabajan juntos están adiestrados en el desempeño de varias funciones de forma que pueden aportar flexibilidad y eficiencia a la célula de trabajo. Los layouts JIT permiten a los empleados trabajar juntos de manera que puedan comentar entre sí problemas y posibles mejoras. Cuando los layouts se utilizan para operaciones consecutivas, la realimentación entre operarios puede ser inmediata. Los defectos son un derroche. Cuando los trabajadores producen artículos de uno en uno, controlan la calidad de cada producto o componente en cada una de las sucesivas etapas del proceso de producción. Las máquinas de las células de trabajo con funciones de comprobación automática *poka-yoke* detectan los defectos y se paran automáticamente cuando éstos aparecen. Antes del JIT, los productos defectuosos se reemplazaban por otros del inventario. Como no se mantiene excedente de inventario en las instalaciones JIT, no existe esta alternativa. Es fundamental hacerlo bien a la primera.

En un sistema JIT, cada trabajador inspecciona la pieza cuando le llega. Cada trabajador sabe que la pieza debe estar bien terminada antes de que pase al siguiente "cliente".

Reducción de espacio y de inventario

Como los layouts JIT reducen las distancias de los desplazamientos, reducen también el inventario mediante la eliminación de espacios disponibles para almacenar inventario. Cuando hay poco espacio, hay que mover el inventario en lotes muy pequeños o incluso unidad a unidad. Las unidades están siempre en movimiento porque no hay lugar de almacenamiento. Por ejemplo, todos los meses, la instalación especializada de Security Pacific Corporation maneja 7 millones de cheques, procesa 5 millones de declaraciones y envía por correo 190.000 declaraciones de sus clientes. Con un layout JIT se ha reducido el tiempo de proceso del correo en un 33 por ciento, los costes salariales en decenas de millares de dólares al año, el espacio necesario en un 50 por ciento y las colas de espera durante el proceso entre un 75 y un 90 por ciento. El espacio para almacenamiento, incluidas las estanterías y los cajones, ha sido eliminado.

INVENTARIO

Los inventarios en los sistemas de producción y de distribución existen a menudo "por si acaso" algo no va bien. Es decir, se utilizan sólo en el caso de que ocurra alguna variación respecto al plan de producción. El inventario "extra" se utiliza entonces para afrontar y "tapar" variaciones o problemas. Las tácticas eficaces de inventario tienen que ser "justo a tiempo", y no "por si acaso" (*just in time* y no *just in case*). El **inventario justo a tiempo** es el mínimo inventario necesario para mantener en funcionamiento un sistema perfecto. Con un inventario justo a tiempo (JIT), llega la cantidad exacta de materiales en el momento en el que se necesita, ni un minuto antes ni un minuto después. El recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "Intentemos el inventario cero" sugiere que se puede conseguir. La Tabla 6.4 muestra algunas tácticas JIT relativas al inventario que se comentan más detalladamente en las siguientes secciones.

Inventario justo a tiempo
El inventario justo a tiempo es el mínimo inventario necesario para mantener un sistema perfecto en funcionamiento.

Reducir la variabilidad

La idea subyacente al sistema JIT consiste en suprimir el stock que oculta la variabilidad en el sistema productivo. Este concepto se muestra en la Figura 6.1, que representa un lago lleno de rocas. El agua en el lago representa el flujo de inventario, y las rocas representan problemas como entregas retrasadas, averías de la maquinaria, y un rendimiento deficiente de los empleados. El nivel del agua en el lago oculta la variabilidad y los problemas. Como el inventario oculta los problemas, es difícil encontrarlos.



"El inventario es diabólico".
Shigeo Shingo

Reducir el inventario

Los directores de operaciones empiezan a aplicar el sistema JIT suprimiendo los inventarios. La reducción del stock deja al descubierto las rocas de la Figura 6.1(a) que representan la variabilidad y los problemas que hasta ese momento se venían tolerando. Al reducir el inventario, la dirección va eliminando los problemas que se van descubriendo hasta que el lago se queda sin obstáculos. En el momento en que el lago no tiene obstáculos, los directores realizan nuevas reducciones de inventario y continúan eliminando el siguiente grupo de problemas que aparecen [*véase* la Figura 6.1 (b)]. Al final no quedarán prácticamente ni stocks ni problemas (variabilidad).

Dell estima que los rápidos cambios de la tecnología cuestan entre un 0,5 y un 2 por ciento del valor de su inventario *cada semana*. Shigeo Shingo, codesarrollador del sistema JIT de Toyota, dice que "el inventario es diabólico". No está muy equivocado. Si el inventario no es diabólico en sí mismo, oculta lo malo a un coste muy elevado.

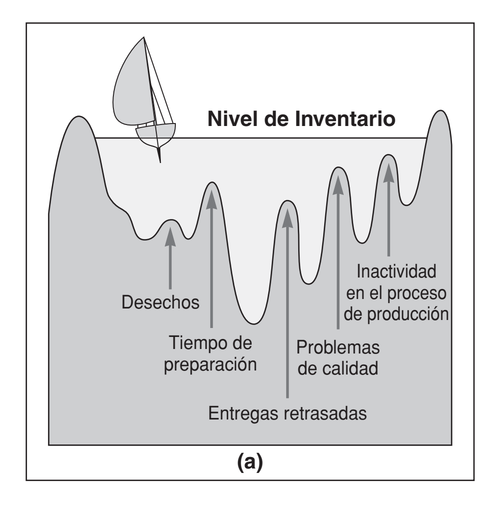
TABLA 6.4 ■ Tácticas JIT sobre el inventario

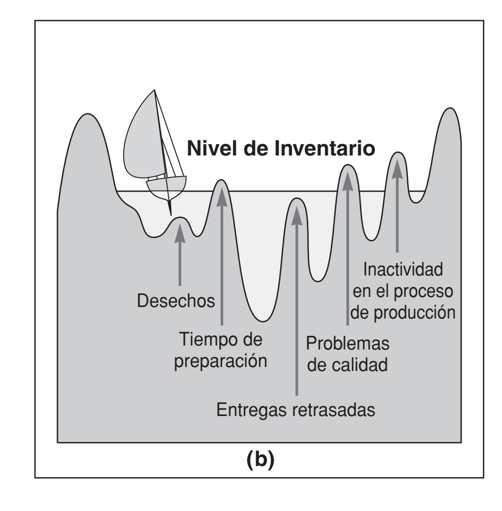
Utilizar un sistema de "tirar o arrastrar" para mover el inventario
Reducir el tamaño de los lotes
Desarrollar sistemas de entrega JIT con los proveedores
Efectuar las entregas directamente a los puntos de utilización
Cumplir el programa
Reducir los tiempos de preparación
Utilizar tecnología de grupo

Reducir el tamaño de los lotes

Justo a tiempo también significa eliminación de desperdicios mediante la reducción de la inversión en inventario. La clave del JIT consiste en producir productos de calidad en pequeños lotes. La reducción del tamaño de los lotes puede ser una importante ayuda en la reducción del stock y de sus costes. Como vimos en el Capítulo 2, cuando el consumo de inventario es constante, el nivel medio de inventario es la suma del inventario máximo y del mínimo dividido entre dos. La Figura 6.2 muestra que, al reducir el tamaño de los pedidos, aumenta el número de éstos, pero se reducen drásticamente los niveles de inventario.

De manera ideal, en un entorno JIT, el tamaño del lote sería la unidad, y se "tira o arrastra" de unidades individuales que se mueven de un proceso al siguiente. De forma más realista, cuando se determina el tamaño del lote hay que analizar el proceso, el tiempo de







Navegando a través de los problemas de exceso de inventario

FIGURA 6.1 ■ El inventario tiene dos costes, uno el de poseerlo y otro el de los problemas que oculta, como el agua de un lago oculta las rocas

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

INTENTEMOS EL INVENTARIO CERO

Las tácticas justo a tiempo se están incorporando en fabricación para mejorar la calidad, disminuir la inversión en inventario y reducir otros costes. Sin embargo, el sistema JIT es también una práctica corriente en los restaurantes, en los que los clientes lo dan por seguro, y es una necesidad en el negocio de los productos de alimentación, en los que no hay otra elección. Pacific Pre-Cut Produce, una empresa de procesamiento de frutas y hortalizas de 14 millones de dólares, establecida en Tracy, California, tiene un inventario cero. Los compradores trabajan a primeras horas de la madrugada. A las seis de la mañana llegan los equipos de producción a las instalaciones de la empresa. Desde las ocho de la mañana hasta las cuatro de la tarde, se reciben los pedidos de cortes y mezclas especiales de frutas y ensaladas de verduras, y de ingredientes para sofritos, para supermercados, restaurantes y cocinas de instituciones. Los envíos empiezan a salir a las diez de la noche y continúan despachándose hasta que se ha servido el último pedido a las cinco de la mañana del día siguiente.

En ese momento, el inventario se ha reducido de nuevo a cero y las cosas están relativamente tranquilas durante una hora más o menos; a continuación, la rutina arranca de nuevo. Pacific Pre-Cut Produce ha cumplido un ciclo completo de compra, fabricación y envío en 24 horas aproximadamente.

El vicepresidente Bob Borzone describe el proceso como el no va más en personalización en masa. "Compramos todos los productos en grande cantidades, después los cortamos para que se ajusten exactamente a los requerimientos del usuario final. Hay 20 mezclas de ingredientes de sofrito diferentes. Algunos clientes quieren que las judías verdes estén cortadas por las dos puntas; otros, sólo por una punta. Algunos quieren sólo pimientos rojos en la mezcla; otros, sólo pimientos amarillos. Adaptamos el producto a las necesidades del cliente. Tratamos de satisfacer las necesidades de muchos usuarios finales, y cada restaurante y cada tienda quiere parecer diferente".

Fuente: Supermarket News (27 de septiembre de 2004): 31; *Inbound Logistics* (agosto, 1997): 26-32; y *Progressive Grocer* (enero de 1998): 51-56.

transporte y los contenedores utilizados para efectuarlo. Este análisis suele dar como resultado un tamaño del lote pequeño, pero mayor que uno. Una vez definido el tamaño del lote, se puede modificar el modelo de gestión de inventarios EOQ para determinar el tiempo de

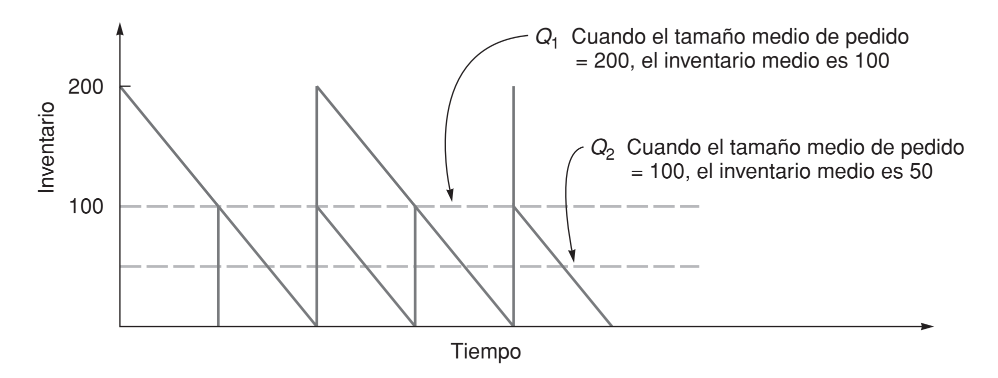


FIGURA 6.2 ■ Los pedidos frecuentes reducen el inventario medio

Un menor tamaño de pedido aumenta el número de pedidos y el coste total de lanzamiento de pedidos, pero reduce el inventario medio y el coste de almacenamiento total.

preparación deseado. En el Capítulo 2 se vio que el modelo de cantidad de pedido en producción adopta la forma:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H[1 - (d/p)]}} \qquad \textbf{(6.1)}$$

donde
D = Demanda anual
S = Coste de preparación
H = Coste de almacenamiento
d = Demanda diaria
p = Producción diaria

El Ejemplo 1 muestra cómo Crate Furniture, Inc., una empresa que produce muebles rústicos, busca un tamaño de lote reducido.

Sólo se necesita hacer dos cambios para que funcione este flujo de material en pequeños lotes. En primer lugar, hay que mejorar el manejo de los materiales y el flujo de trabajo. Con ciclos de producción cortos, puede haber muy poco tiempo de espera. Mejorar la manutención de los materiales normalmente es fácil y sencillo. El segundo cambio es más difícil, ya que hay que reducir radicalmente los tiempos de preparación. Analizaremos la reducción de la preparación a continuación.

Reducir los costes de preparación (cambio)

Tanto el inventario como el coste de almacenamiento se reducen conforme disminuyen la cantidad que se ordena de cada vez y el nivel máximo del inventario. Sin embargo, como el reponer inventario obliga a incurrir en costes de lanzamiento de pedido o costes de preparación que deben repercutirse en las unidades que se compren o produzcan, los directivos tienden a comprar (o producir) en grandes cantidades. Si se hacen pedidos de compra u órdenes de producción en grandes cantidades, cada unidad que se compra o se produce absorbe sólo una pequeña parte del coste de lanzamiento/preparación. Por consiguiente, la forma de reducir el tamaño de los lotes *y* al mismo tiempo reducir el inventario medio consiste en reducir el coste de preparación, lo que a su vez reduce el tamaño óptimo de pedido.

EJEMPLO 1

Cálculo del tiempo de preparación (cambio) óptimo

La analista de producción de Crate Furniture, Aleda Roth, determinó que sería aceptable un ciclo de producción de dos horas entre dos departamentos (lotes de 2 horas de producción). Además, llegó a la conclusión de que se podía lograr un tiempo de preparación (cambio) que se ajustara al tiempo de ciclo de dos horas. Roth definió los siguientes datos y procedimiento para calcular analíticamente el tiempo óptimo de preparación:

D = Demanda anual = 400.000 unidades
d = Demanda diaria = 400.000 entre 250 días = 1.600 unidades al día
p = Tasa de producción diaria = 4.000 unidades al día
Q = EOQ deseado = 400 (que es la demanda de 2 horas, es decir, 1.600 al día/4 periodos de 2 horas)
H = Coste de almacenamiento = 20 dólares por unidad y año
S = Coste de preparación (por determinar)

Roth sabe que el coste por hora de la mano de obra para preparar un equipo es de 30 dólares. A continuación, calcula que el coste de cada preparación debería ser:

$$Q = \sqrt{\frac{2DS}{H(1 - d/p)}}$$

$$Q^2 = \frac{2DS}{H(1 - d/p)}$$

$$S = \frac{(Q^2)(H)(1 - d/p)}{2D}$$

$$S = \frac{(400)^2(20)(1 - 1.600/4.000)}{2(400.000)}$$

$$= \frac{(3.200.000)(0,6)}{800.000} = 2,40\$$$

Tiempo de preparación = 2,40 dólares/(coste por hora de la mano de obra)
= 2,40 dólares/(30 dólares por hora)
= 0,08 horas o 4,8 minutos

Ahora, en lugar de producir componentes en grandes lotes, Crane Furniture puede producir en ciclos de 2 horas con la ventaja de tener una rotación de inventario de 4 veces *por día.*

El efecto de reducir los costes de preparación sobre el coste total y el tamaño de los lotes se muestra en la Figura 6.3. Además, lotes de menor tamaño ocultan menos problemas. En muchos casos, el coste de preparación está muy relacionado con el tiempo de preparación. En las instalaciones manufactureras, las preparaciones o cambios en las máquinas requieren una gran cantidad de tareas. Gran parte de las tareas necesarias para el cambio o preparación de una máquina pueden hacerse antes de parar la máquina o proceso. Los tiempos de preparación pueden reducirse sustancialmente, como se muestra en la Figura 6.4. Por ejemplo, en las instalaciones de Kodak en Guadalajara, México, un equi-

La reducción del tamaño de los lotes debe venir acompañada por menores tiempos de preparación; si no, habrá que repartir el coste de la preparación entre un menor número de unidades.

FIGURA 6.3 ■ Reducir los costes de preparación reducirá el coste total

El aumento de la frecuencia de las órdenes de producción o pedidos de compra exige reducir el coste de preparación o lanzamiento; si no, aumentarán los costes de inventario. Conforme se reducen los costes de preparación (de S_1 a S_2), también se reducen los costes de inventario (de T_1 a T_2).

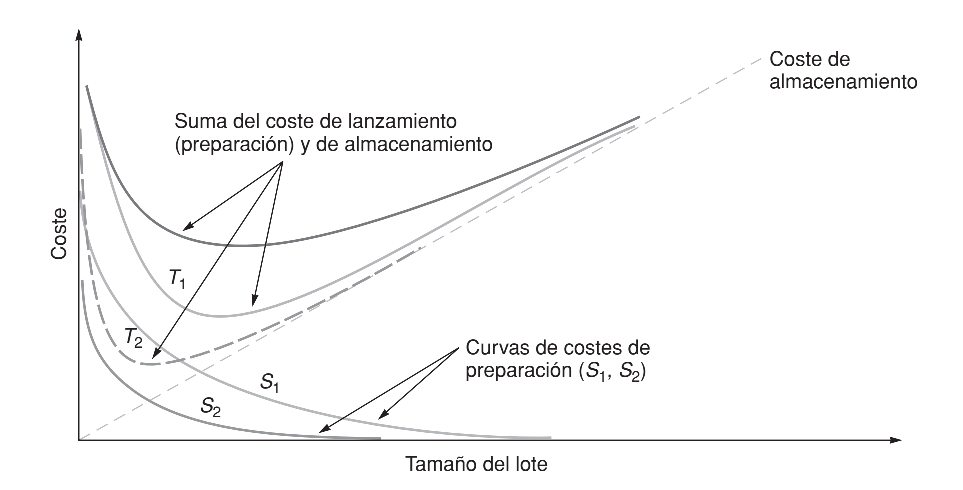
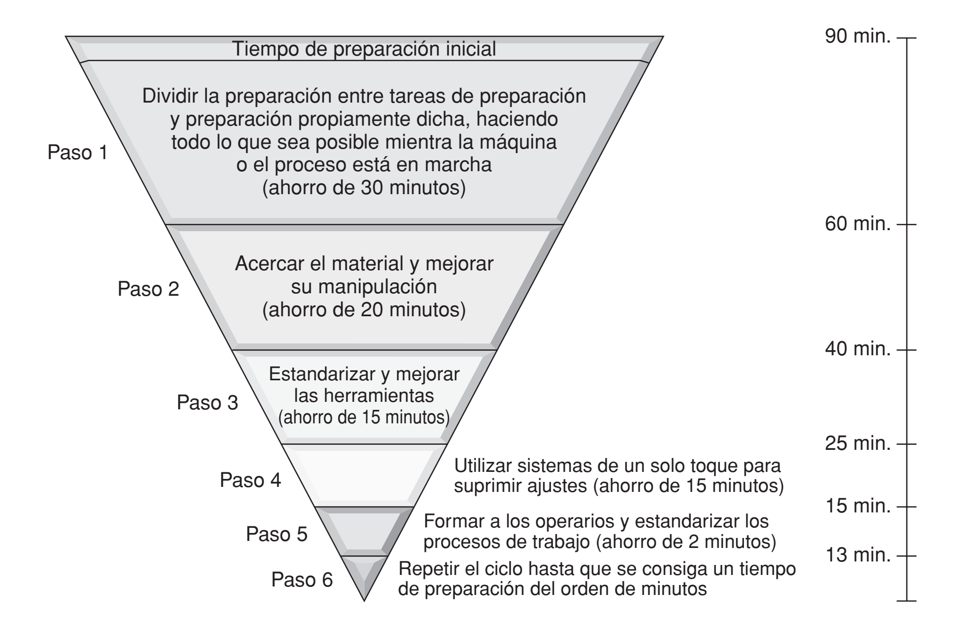


FIGURA 6.4 ■ Pasos para reducir los tiempos de preparación

Los tiempos de preparación reducidos son uno de los principales componentes del JIT.



po redujo el tiempo para cambiar un cojinete ¡de 12 horas a 6 minutos![2] Éste es el típico ejemplo de las mejoras que hacen los fabricantes de clase mundial.

Igual que se puede reducir el coste de preparación de una máquina en una fábrica, también se puede reducir el tiempo de preparación en el proceso de tener un pedido listo. No sirve de mucho rebajar el tiempo de preparación en la fábrica de varias horas a pocos minutos si se tarda dos semanas en procesar o "preparar" los pedidos u órdenes en la oficina. Esto es precisamente lo que sucede en organizaciones que olvidan que los conceptos del sistema JIT también se aplican en las oficinas. La reducción del tiempo (y del coste) de preparación es una excelente manera de reducir la inversión en inventario y de mejorar la productividad.

---

[2] Frank Carguello y Marty Levin, "Excellence at Work in Guadalajara, Mexico", *Target 15,* n.º 3 (tercer trimestre, 1999): 51-53.

PROGRAMACIÓN

La programación eficaz, comunicada tanto dentro de la organización como a los proveedores externos, da soporte al JIT. La mejora de la programación también aumenta la capacidad de satisfacer los pedidos de los clientes, reduce el inventario al permitir tamaños de lote más pequeños, y reduce el trabajo en curso. Por ejemplo, Ford Motor Company liga a algunos de sus proveedores a su programa de montaje final. Ford comunica su programación al fabricante de parachoques, Polycon Industries, desde el sistema de control de la producción de Oakville. El sistema de programación describe el modelo y el color de los parachoques que necesita para cada vehículo que se está desplazando por la cadena final de montaje. El sistema de programación transmite la información a los terminales portátiles que lleva el personal del almacén de Polycon, que carga los parachoques en las cintas que conducen a la terminal de carga. Los parachoques se transportan en camiones a la fábrica de Ford, situada a unos 80 kilómetros de distancia. El tiempo total es de 4 horas. La Tabla 6.5 sugiere varios puntos que pueden ayudar a conseguir este objetivo, pero hay dos técnicas (además de comunicar la programación) que son clave: los *programas equilibrados* y los *kanbans*.

TABLA 6.5 ■ Tácticas de programación JIT

Comunicar la programación a los proveedores
Hacer programas equilibrados
Congelar parte de la programación
Cumplir la programación
Intentar que una pieza fabricada sea una pieza trasladada
Eliminar los desperdicios
Producir en lotes reducidos
Utilizar kanbans
Hacer que cada operación produzca una pieza perfecta

Programas equilibrados

Los **programas equilibrados** procesan frecuentes lotes pequeños, en vez de unos pocos grandes lotes. Como esta técnica programa muchos pequeños lotes que cambian constantemente, se ha denominado a veces programación "gominola" (*jelly bean scheduling*). La Figura 6.5 compara el enfoque tradicional de grandes lotes empleando grandes tandas de producción con un programa equilibrado JIT utilizando muchas pequeñas tandas de producción. La tarea del director de operaciones es producir y trasladar pequeños lotes de forma que el programa equilibrado sea económico. Esto exige que se logren resolver los problemas analizados en este capítulo de forma que se puedan producir lotes pequeños. A medida que disminuye el tamaño de los lotes, es posible que cambien las restricciones y que sea cada vez más difícil cumplirlas. En algún momento, es posible que no sea viable procesar sólo una unidad o dos. La restricción puede ser la forma en que se venden y envían las unidades (cuatro por caja) o un cambio de pintura caro (en una cadena de montaje de automóviles), o el número adecuado de unidades en un esterilizador (en una línea de enlatado de alimentos).

Programas equilibrados
Programación de los productos de forma que la producción de cada día satisfaga la demanda de ese día.

El programador puede encontrar que la *congelación* de la parte del programa más próxima a las fechas de entrega permite que funcione el sistema de producción y, al mismo tiempo, que se cumpla la programación. Por congelación se entiende que no se permiten

FIGURA 6.5 ■ Programar pequeños lotes de las piezas A, B y C aumenta la flexibilidad para satisfacer las demandas de los clientes y reduce el inventario

En cada periodo de tiempo, el enfoque de programación JIT produce tantas unidades de cada modelo como el enfoque de grandes lotes, siempre y cuando se hayan reducido los tiempos de preparación.

Un kanban no tiene que ser siempre una señal tan formal como una luz o un carrito vacío. El cocinero de un restaurante de comida rápida sabe que cuando hay seis automóviles en la fila debería empezar a preparar ocho hamburguesas y seis órdenes de patatas fritas.

cambios en la programación. Los directores de operaciones esperan que se cumpla el programa sin ninguna desviación.

Kanban

Una forma de conseguir tamaños de lote pequeños es mover el inventario a través de los talleres sólo cuando es necesario, en vez de "empujarlo" a la siguiente estación de trabajo, esté el personal de la misma preparado para recibirlo o no. Como se dijo antes, cuando se mueve el inventario sólo cuando hace falta, se dice que se trata de un sistema de tirón o arrastre (*pull*), y el tamaño de lote ideal es de una unidad. Los japoneses llaman a este sistema *kanban*. Los kanbans permiten que las llegadas a un centro de trabajo igualen (o casi igualen) el tiempo de proceso.

Kanban
Voz japonesa que significa *tarjeta* que indica una "señal"; el sistema kanban tira o arrastra las piezas a lo largo de la producción cuando se produce una señal.

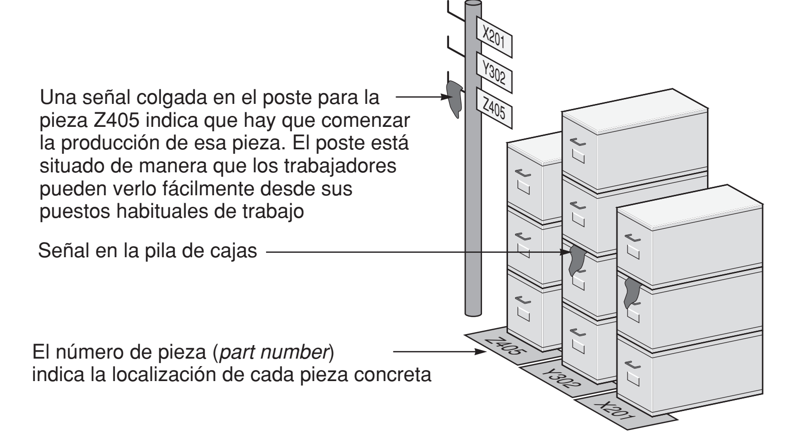
Kanban es una palabra japonesa que significa *tarjeta*. En su esfuerzo por reducir el inventario, los japoneses utilizan sistemas que tiran del inventario a través de los centros de trabajo. Muchas veces utilizan una "tarjeta" para señalar la necesidad de otro contenedor de material (de ahí el nombre de *kanban*). *La tarjeta es la autorización para que se produzca el siguiente contenedor de material*. Normalmente, existe una señal kanban para cada contenedor de artículos a elaborar. Por cada kanban, se inicia entonces una orden para el contenedor correspondiente y es "tirada o arrastrada" desde (se produce en) el departamento de producción o desde el proveedor. Una secuencia de kanbans "tira" del material a través de la planta.

En muchas instalaciones se ha modificado el sistema de forma que, aunque se sigue llamando kanban, no existen tarjetas. En algunos casos, un hueco en el suelo del taller es indicio suficiente de que hace falta el siguiente contenedor. En otros casos, una señal cualquiera, como una bandera o un trapo (*véase* la Figura 6.6) avisa de que es el momento para el siguiente contenedor.

Cuando hay contacto visual entre el productor y el usuario, el proceso funciona de la siguiente manera:

1. El usuario toma un contenedor estándar de piezas de una pequeña zona de almacenamiento, como se muestra en la Figura 6.6.
2. La señal en la zona de almacenamiento puede ser vista por el departamento de producción que la interpreta como una autorización para reponer material al departamento de utilización o zona de almacenamiento. Como hay un tamaño óptimo de lote, el departamento de producción puede fabricar varios contenedores cada vez.

FIGURA 6.6 ■ Diagrama de un lugar de almacenamiento de salida de materiales con señales kanban



La Figura 6.7 muestra cómo funcionan los kanban, tirando de las unidades a medida que se van necesitando a través de las sucesivas fases de la producción. Este sistema es parecido al reabastecimiento que se produce en el supermercado de su barrio: el cliente compra; el responsable de suministros observa el estante o recibe la lista de ventas al final del día y reabastece. Cuando las existencias limitadas, si hay, se están agotando en el almacén de la tienda, se envía una señal de "tirón o arrastre (*pull*)" al almacén central, al distribuidor o al fabricante, para que reabastezcan, normalmente por la noche. El factor que complica las cosas en una empresa manufacturera es la necesidad de que ocurra al mismo tiempo que la fabricación (producción).

Hay otros varios puntos relativos a los kanbans que pueden resultar útiles:

- Cuando el productor y el usuario no tienen contacto visual, se puede utilizar una tarjeta; si no, puede ser pertinente utilizar una luz, o una bandera, o un espacio vacío en el suelo.
- Puesto que la estación que tira o arrastra puede necesitar reabastecerse de varios componentes, se pueden utilizar distintas técnicas de "tirar o arrastrar", distintos kanban, para diferentes productos en la misma estación que "tira o arrastra".
- Normalmente, cada tarjeta controla una cantidad específica de una pieza, aunque se utilizan sistemas de múltiples tarjetas si la célula de trabajo productora fabrica diversos componentes o si el tamaño del lote de producción es distinto del de movimiento.
- En un sistema MRP (*véase* el Capítulo 4), se puede considerar que el programa es como una autorización para "construir" y que el kanban es un tipo de sistema de "tirar o arrastrar" que inicia realmente la producción.
- Las tarjetas kanban proporcionan un control (límite) directo de la cantidad de trabajo en curso entre células.

Los contenedores kanban en Harley-Davidson están hechos especialmente para componentes o piezas específicas, y muchos disponen de acolchados para proteger los acabados. Estos contenedores desempeñan un importante papel en la reducción de los stocks: puesto que son el único lugar en que se almacena stock, sirven como señal para que se suministren nuevas piezas a la línea. Cuando se han utilizado todas las piezas, el contenedor se devuelve a su célula originaria, indicando a sus trabajadores que han de producir nuevas piezas.



JIT en Harley Davidson

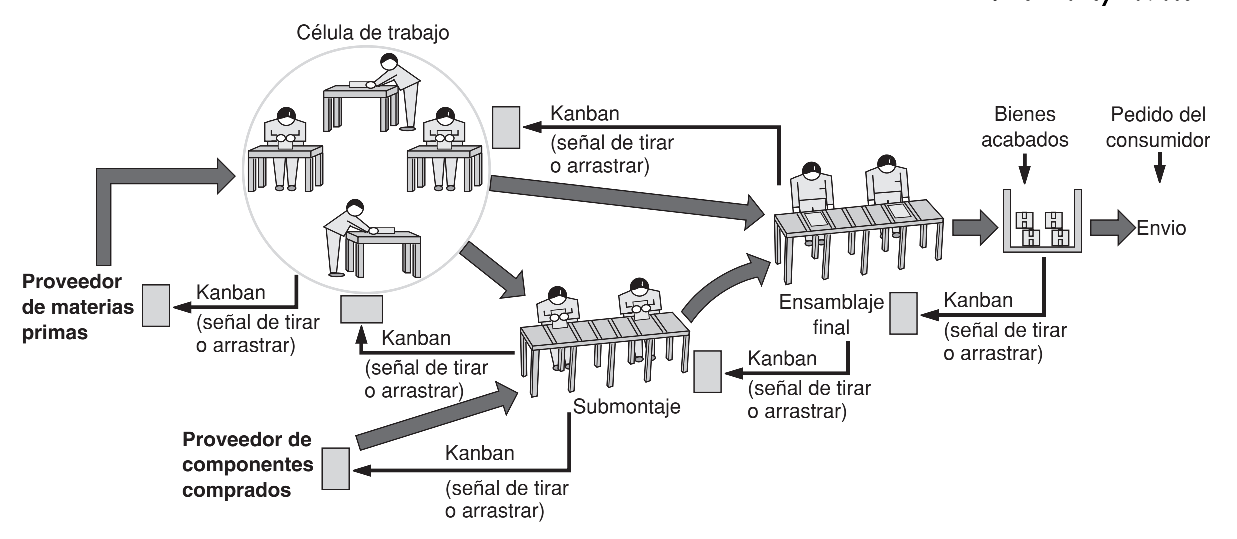


FIGURA 6.7 ■ Las señales kanban "tiran" de los materiales a través del proceso de producción

Cuando un cliente "tira o arrastra" con un pedido de los productos acabados, se envía una señal (tarjeta) a la zona del ensamblaje final. La zona del ensamblaje final produce y repone los productos acabados que se llevó la orden del cliente. Cuando el montaje final necesita componentes, envía una señal a sus proveedores, un área de submontaje y una célula de trabajo. Estas áreas proveen al ensamblaje final. La célula de trabajo, a su vez, envía una señal al proveedor de materia prima y el área de submontaje notifica una necesidad a la célula de trabajo y a un proveedor de componentes.

- Si hay un área de almacenamiento directamente entre productor y usuario, puede utilizarse un sistema de dos tarjetas. En este sistema, una tarjeta circula entre el usuario y el área de almacenamiento y la otra entre el área de almacenamiento y la zona de producción.

Determinación del número de tarjetas kanban o de contenedores El número de tarjetas kanban o de contenedores en un sistema JIT determina la cantidad de inventario autorizado. Para determinar el número de contenedores que se mueven entre la zona de utilización y la de producción, la dirección establece en primer lugar el tamaño de cada contenedor. Esto se hace calculando el tamaño del lote mediante un modelo como el de la cantidad de pedido en producción (descrito en el Capítulo 2 y también anteriormente en este capítulo en la Ecuación 6.1). Para definir el número de contenedores hay que saber (1) el plazo necesario para producir un contenedor de piezas y (2) el nivel de existencias de seguridad necesario para hacer frente a la variabilidad o incertidumbre en el sistema. El número de tarjetas kanban se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Número de kanbans (contenedores)} = \frac{\text{Demanda durante el plazo de producción} + \text{Stock de seguridad}}{\text{Tamaño del contenedor}}$$

La ratio inventario/ventas de los fabricantes continúa disminuyendo, en gran parte gracias a los inventarios JIT.

El Ejemplo 2 ilustra cómo se calcula el número de kanbans necesarios.

Ventajas del kanban Los contenedores suelen ser muy pequeños, normalmente representan el trabajo de unas pocas horas de producción. Un sistema como éste requiere una

EJEMPLO 2

Cálculo del número de contenedores (*kanbans*)

La panadería Hobbs produce pequeñas hornadas de pasteles que envía a tiendas de alimentación. El propietario, Ken Hobbs, quiere intentar reducir el inventario cambiando a un sistema kanban. Le ha dado los siguientes datos y le pide que termine el proyecto diciéndole el número de kanbans (contenedores) necesarios.

Demanda diaria = 500 pasteles

Plazo de producción = Tiempo de espera + Tiempo de manejo de material + Tiempo de proceso = 2 días

Stock de seguridad = $\frac{1}{2}$ día

Tamaño del contenedor (determinado a partir del tamaño de orden de producción EOQ) = 250 pasteles

Solución

Demanda durante el plazo de producción (= plazo × demanda diaria = 2 días × 500 pasteles =) 1.000

Existencias de seguridad = 250

Número de kanbans (contenedores) necesarios =

$$\frac{\text{Demanda durante el plazo de producción + Stock de seguridad}}{\text{Tamaño del contenedor}} = \frac{(1.000 + 250)}{250} = 5$$

programación muy ajustada. Hay que producir pequeñas cantidades varias veces al día. El proceso debe funcionar con suavidad, con poca variabilidad en el plazo de producción o aprovisionamiento, porque cualquier falta de suministros tiene una repercusión casi inmediata en todo el sistema. El kanban pone mayor énfasis en cumplir la programación, en reducir el tiempo y el coste de las preparaciones o cambios en las máquinas y en una manipulación económica de los materiales.

Ya se llame kanban o de cualquier otra manera, son muy importantes las ventajas de los inventarios reducidos y de "tirar o arrastrar" del material a través de la planta de producción sólo cuando hace falta. Por ejemplo, los lotes pequeños permiten que sólo haya una muy pequeña cantidad de material defectuoso o retrasado. Los problemas se ponen de manifiesto inmediatamente. Muchos aspectos del inventario son perniciosos: sólo un aspecto, su disponibilidad, es bueno. Entre los aspectos desfavorables del inventario están la mala calidad, la caducidad, los desperfectos, el espacio que ocupa, los recursos comprometidos, el mayor coste de los seguros, el mayor manejo de materiales y el mayor número de accidentes. Los sistemas kanban presionan para eliminar todos estos aspectos negativos del inventario.

Los sistemas kanban en las fábricas utilizan a menudo contenedores estándar y reciclables, que protegen las piezas que se han de trasladar. Esos contenedores son también deseables en la cadena de suministros. Los contenedores estándar reducen el peso y los costes de desecho, significan menos espacio desperdiciado en los camiones y requieren menos mano de obra para embalar, desembalar y preparar los artículos.

La planta de la empresa New United Motor Manufacturing (NUMMI) en Freemont, California, que produce los automóviles Toyota Corolla y GM Prizm, es una empresa conjunta (joint venture) entre Toyota y General Motors. La planta fue diseñada como una instalación justo a tiempo (JIT). La dirección llegó incluso a trasladar un depósito de agua para garantizar que los nuevos muelles de carga facilitasen las entregas JIT y los movimientos JIT de los artículos dentro de la fábrica. Esta planta, como la mayoría de las instalaciones JIT, también potencia a sus empleados de manera que éstos pueden detener por completo la línea de producción, tirando de un cable situado por encima de ellos, si detectan cualquier problema de calidad.

CALIDAD

La relación entre el sistema JIT y la calidad es muy fuerte. Ambos se relacionan de tres formas. En primer lugar, el método JIT reduce el coste necesario para conseguir una buena calidad. Este ahorro se consigue porque los desperdicios, el rehacer trabajos, la inversión en inventario y el coste de daños y perjuicios están ocultos en el inventario. JIT obliga a reducir el inventario, por lo que se producen menos artículos defectuosos y hay que rehacer menos unidades. En una palabra, mientras que el inventario *oculta* la mala calidad, el sistema JIT la *descubre* enseguida.

En segundo lugar, el JIT mejora la calidad. Como el JIT reduce las filas y el plazo de producción, mantiene fresca la memoria de los errores y limita el número de causas posibles de éstos. En efecto, el JIT crea un sistema de alerta inmediata en caso de que se produzcan problemas de calidad, por lo que se producen menos unidades defectuosas y la retroalimentación (*feedback*) es inmediata. Esta ventaja puede obtenerse tanto dentro de la empresa como para el caso de artículos recibidos de proveedores externos.

Finalmente, una mejor calidad implica que se necesitan menos stocks de seguridad (*buffers*) y, por lo tanto, se puede conseguir un sistema JIT mejor y más fácil de utilizar. A menudo, el propósito de mantener inventario es protegerse contra una calidad poco fidedigna. Si se puede contar con un nivel de calidad constante, el JIT permite a las empresas reducir todos los costes relacionados con el inventario. La Tabla 6.6 propone algunos requisitos para la calidad en un entorno JIT.

TABLA 6.6 ■ Tácticas de calidad JIT

Utilizar el control estadístico de procesos
Delegar competencias en los empleados (potenciación)
Desarrollar métodos a prueba de errores (*poka-yoke*, listas de comprobación, etc.)
Exponer la mala calidad con lotes pequeños justo a tiempo
Suministrar retroalimentación (*feedback*) inmediata

POTENCIACIÓN DE LOS EMPLEADOS

Mientras que algunas técnicas JIT requieren decisiones de política y estrategia, muchas otras entran dentro del ámbito de los empleados en los que se ha delegado responsabilidades. Los empleados potenciados pueden aportar su participación para ocuparse de la mayoría de los aspectos de las operaciones diarias, lo que constituye una parte importante de la

filosofía JIT. Esto significa que aquellas tareas que tradicionalmente se habían asignado al personal de apoyo o intermedio se pueden delegar a los empleados potenciados.

La potenciación de los empleados parte del adagio directivo que afirma que nadie conoce mejor el trabajo que aquellos que lo hacen. Las empresas no sólo tienen que formar y, sobre todo, formar en diferentes puestos a sus empleados, sino que también tienen que sacar provecho de esa inversión enriqueciendo los puestos de trabajo. Con la ayuda de una agresiva formación multifuncional y pocas clasificaciones de puestos de trabajo, las empresas pueden conseguir que los empleados se impliquen, tanto mental como físicamente, en la retadora tarea de mejorar el puesto de trabajo.

La filosofía JIT de mejora continua da a los empleados la oportunidad de enriquecer su trabajo y su vida. Cuando la potenciación se gestiona con éxito, las empresas se benefician del compromiso mutuo y del respeto entre los empleados y la dirección.

PRODUCCIÓN AJUSTADA (*LEAN*)

La producción ajustada, o enjuta[3], puede considerarse como el resultado final de una función de dirección de operaciones bien realizada. La principal diferencia entre el JIT y la producción ajustada es que el JIT es una filosofía de mejora continua, con un enfoque hacia el *interior*, mientras que la producción ajustada se inicia *externamente* con un enfoque hacia el cliente. Entender lo que quiere el cliente y asegurar el input del cliente y su *feedback* constituyen los puntos de partida de la producción enjuta. La producción ajustada significa identificar lo que tiene valor para el consumidor, analizando todas las actividades necesarias para fabricar el producto, y optimizar a continuación todo el proceso desde la perspectiva del consumidor. El directivo descubre qué es lo que crea valor para el consumidor, y qué no.

Sistema de Producción de Toyota (TPS)
Desarrollado por Toyota Motor Company, el sistema de producción de Toyota es el precursor de los conceptos de la producción ajustada, que pone el énfasis en el aprendizaje y en la potenciación de los empleados.

La producción ajustada se denomina a veces **Sistema de Producción de Toyota (TPS)**, ya que se considera que Eiji Toyoda y Taiichi Ohno, de Toyota Motor Company, son los creadores de este enfoque y estas innovaciones[4]. Hay cuatro principios subyacentes al TPS:

- El trabajo deberá estar completamente especificado en cuanto a contenidos, secuencia, plazos y resultados.
- Todas las relaciones cliente-proveedor, tanto internas como externas, deben ser directas y especificar personas, métodos, plazos y cantidad de bienes o servicios suministrados.
- Los flujos de productos y servicios deben ser sencillos y directos: los bienes y servicios se dirigen a una persona o máquina específica.
- Cualquier mejora en el sistema debe hacerse siguiendo el "método científico", en el nivel más bajo posible de la organización[5].

El sistema de producción de Toyota requiere que las actividades, relaciones y flujos tengan controles incorporados que señalen automáticamente los problemas. Cualquier dife-

---

[3] *Lean production:* se suele traducir por "producción ajustada", pero el adjetivo *enjuto* ofrece más esa connotación del inglés original de sistema productivo parco, magro, con estrictamente lo necesario (N. del T.).

[4] Eiji Toyoda pertenecía a la familia fundadora de Toyota Motor Company y Taiichi Ohno era director de producción.

[5] Adaptado de Steven J. Spear, "Learning to Lead at Toyota", *Harvard Business Review* 82, n.º 5 (mayo de 2004): 78-86; Steven Spear y H. Kent Bowen, "Decoding the DNA ot the Toyota Production System", *Harvard Business Review* 77, n.º 5 (septiembre-octubre de 1999): 97-106.

rencia entre lo esperado y lo que ocurre se hace evidente de inmediato. Es la educación y la formación de los empleados de Toyota, y la capacidad de respuesta del sistema ante los problemas, lo que hace que un sistema aparentemente tan rígido sea tan flexible y adaptable a las circunstancias cambiantes. El resultado es una mejora permanente en fiabilidad, flexibilidad, seguridad y eficiencia. Todo ello conduce a aumentar la cuota de mercado y la rentabilidad.

Si hay alguna diferencia entre el JIT, la producción ajustada y el sistema de producción de Toyota (TPS) es que el justo a tiempo pone el énfasis en la mejora continua, la producción ajustada en comprender al cliente, y el sistema de producción de Toyota en el aprendizaje de los empleados y en su potenciación en un entorno de línea de montaje. En la práctica, hay poca diferencia, y los tres conceptos se suelen utilizar como sinónimos.

Creación de una organización ajustada

La transición a una producción enjuta resulta difícil. La creación de una cultura organizativa donde el aprendizaje y la mejora continua son la norma constituye un gran reto. Sin embargo, observamos que las organizaciones que se enfocan hacia el JIT, la calidad y la potenciación de los empleados son a menudo productores ajustados (*lean*). Estas empresas eliminan las operaciones que no añaden valor desde la perspectiva del cliente. Incluyen a empresas líderes, como Toyota, United Parcel Service y Dell Computer. El excepcional rendimiento de Dell se destaca en el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "La producción ajustada de Dell". Estos productores ajustados adoptan una filosofía de minimizar los desperdicios luchando por alcanzar la perfección a través del

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

LA PRODUCCIÓN AJUSTADA DE DELL

La planta de montaje de computadoras de Dell, de 18.500 metros cuadrados, en Austin, Texas, es un ejemplo de producción eficiente. Las prácticas JIT y de producción enjuta de Dell le han permitido ahorrar 500.000 millones de dólares en costes productivos el año pasado. Tanto los proveedores de Dell como su personal de compras valoran los inventarios cada hora para mantener el trabajo en curso (WIP) al mínimo. Equipos de seis personas ensamblan 18 computadoras por hora con componentes que llegan mediante un sistema de cintas transportadoras elevadas. Si la célula tiene un problema, los componentes se dirigen instantáneamente a otra célula, evitando las paradas que son frecuentes en las líneas de montaje tradicionales.

Las prácticas de producción ajustada de Dell empiezan con una retroalimentación instantánea del cliente. Debido a su modelo de ventas directas, Dell es la primera que conoce los cambios en el mercado. Dell ha conseguido tener tanto éxito en la producción ajustada y en el conocimiento de su cliente que en los dos últimos años la producción ha aumentado en un tercio. Durante el mismo periodo, las prácticas enjutas han reducido a la mitad el espacio necesario para producir. Ahora se están probando robots para recortar segundos del tiempo necesario para meter las computadoras en las cajas de cartón. Se están ahorrando segundos adicionales combinando la descarga del software y la prueba de la computadora en un solo paso. Dell mantiene en continua revisión el diseño del producto, simplificando los componentes, acelerando el montaje y ahorrando aún más segundos. El tiempo ahorrado mejora el rendimiento total, añade capacidad y contribuye a la flexibilidad del proceso de producción. Este mayor rendimiento total, capacidad y flexibilidad permiten a Dell responder a los inesperados y frecuentes cambios de la demanda que caracterizan al mercado de los PC.

Dell ha triplicado la producción por metro cuadrado durante los cinco últimos años y espera triplicarla de nuevo durante los próximos cinco años. La reputación de la empresa es tal que el consejero delegado, Michael Dell, está asesorando a la industria estadounidense del automóvil sobre técnicas de fabricación enjuta. El modelo de producción enjuta de Dell está mostrando el camino a seguir.

Fuentes: Forbes (10 de junio de 2002): 110; e *Infotech Update* (julio-agosto, 2001): 6.

aprendizaje continuo, la creatividad y el trabajo en equipo. Para conseguir el éxito hace falta la total implicación y compromiso de todos los empleados y de los proveedores de la empresa. Las recompensas que recogen los productores ajustados son espectaculares. Los productores ajustados a menudo se convierten en punto de referencia (*benchmarks*). Comparten las siguientes características:

- *Utilizan técnicas justo a tiempo* para eliminar prácticamente el inventario.
- *Construyen sistemas que ayudan a los empleados* a producir siempre piezas perfectas.
- *Reducen las necesidades de espacio*, reduciendo las distancias que recorren las piezas.
- *Desarrollan estrechas relaciones con los proveedores*, ayudándoles a comprender sus necesidades y las de sus clientes.
- *Forman a sus proveedores* para que acepten la responsabilidad de ayudar a satisfacer las necesidades de los clientes.
- *Eliminan todas las actividades que no añaden valor*. El manejo de materiales, la inspección, el inventario y el rehacer trabajos están entre los probables objetivos porque no añaden valor al producto.
- *Desarrollan a su personal* mejorando constantemente el diseño de los puestos de trabajo, la formación, la participación y el compromiso de los empleados y el trabajo en equipo.
- *Aumentan el atractivo de los trabajos* delegando competencias al nivel más bajo posible.
- *Reducen el número de categorías laborales* y potencian la flexibilidad de la mano de obra.

Las 5 S

Desde los primeros días del siglo XX los directivos se centraron en "la organización de la casa", y en todo lo que supone tener un lugar de trabajo ordenado, limpio y eficiente. En los últimos años los directores de operaciones han adornado la "organización de la casa" incluyendo una lista de comprobación (*checklist*) que se conoce como las 5 S[6]. Los japoneses desarrollaron las 5 S iniciales. Las 5 S no sólo son una buena lista de comprobación para las operaciones enjutas, sino que también proporcionan un sencillo medio con el que ayudar en el cambio cultural que es necesario a menudo para lograr unas operaciones ajustadas. A continuación se explican las **5 S**:

5 S
Lista de comprobación en un sistema de producción enjuta: clasificar, simplificar, limpiar, estandarizar y mantener.

- ***Clasificar/apartar*:** conserve lo que sea necesario y aparte todo lo demás del área de trabajo; ante la duda, sáquelo. Hay que identificar los artículos que no tienen valor y sacarlos. Al conseguir deshacerse de estos artículos se gana espacio y normalmente mejora el flujo de trabajo.
- ***Simplificar/ordenar*:** ordene y utilice herramientas de análisis de métodos (*véanse* los Capítulos 7 y 10 del volumen *Decisiones Estratégicas*) para mejorar el flujo de trabajo y reducir los movimientos inútiles. Analice los problemas ergonómicos a corto y a largo plazo. Etiquete y haga visible para una fácil utilización sólo lo que se necesite en el área de trabajo. Para ver ejemplos de dispositivos visuales, *véase* el Capítulo 10, Figura 10.8, del volumen *Decisiones Estratégicas*.

---

[6] La denominación 5 S proviene de los vocablos japoneses *seiri* (clasificar y vaciar), *seiton* (ordenar y configurar), *seiso* (lavar y limpiar), *seiketsu* (mantener la salubridad y limpieza de uno mismo y del lugar de trabajo) y *shitsuke* (autodisciplina y estandarización de estas prácticas).

- ***Limpiar/barrer*:** limpiar diariamente; suprimir todo tipo de suciedad, contaminación y desorden en la zona de trabajo.
- ***Estandarlizar*:** eliminar las variaciones del proceso desarrollando procedimientos operativos estandarizados y listas de comprobación; los buenos estándares hacen que lo anormal se haga evidente. Estandarizar los equipos y las herramientas de manera que el tiempo y el coste de la formación multidisciplinar se reduzcan. Forme y vuelva a formar al equipo de trabajo para que cuando se produzcan desviaciones sean constatadas rápidamente por todos.
- ***Mantener/autodisciplina*:** revise periódicamente para reconocer los esfuerzos y para motivar de forma que mantengan los progresos. Utilice elementos visuales siempre que sea posible para comunicar y mantener los progresos.

Los directivos estadounidenses suelen añadir dos S adicionales que contribuyen a establecer y mantener un lugar de trabajo ajustado:

- ***Seguridad*:** desarrolle buenas prácticas de seguridad en las cinco actividades anteriores.
- ***Soporte/mantenimiento*:** reduzca la variabilidad, el tiempo inactivo no planificado y los costes. Integre las actividades diarias de limpieza con el mantenimiento preventivo.

Las S proporcionan un vehículo de mejora continua con el que se pueden sentir identificados todos los empleados. Los directores de operaciones sólo tienen que pensar en los ejemplos de una sala de urgencias hospitalarias bien gestionada o la limpieza y la pulcritus de un parque de bomberos para tener un punto de referencia (*benchmark*). Las oficinas y los comercios, al igual que los fabricantes, también han utilizado con éxito las 5 S en sus respectivos esfuerzos para llegar a las operaciones ajustadas[7].

Los siete desperdicios

Los productores tradicionales tienen objetivos limitados: aceptan, por ejemplo, la producción de algunos componentes defectuosos y el inventario. Los productores enjutos (*lean*) establecen su objetivo en la perfección: no puede haber componentes defectuosos, ni inventarios, sólo actividades que añadan valor, y ningún desperdicio. Taiichi Ohno, conocido por su trabajo en el sistema de producción de Toyota, identificó siete tipos de desperdicios. Estas categorías de desperdicios se han hecho populares en las organizaciones ajustadas y contemplan muchas de las formas en que las organizaciones desperdician o pierden dinero. El cliente define lo que tiene valor para él en el producto. Si producción realiza una actividad que no añade valor desde el punto de vista del cliente, entonces eso es un desperdicio. Si el cliente no lo quiere, o no está dispuesto a pagar por ello, es un desperdicio. Los **siete desperdicios** de Ohno son:

Siete desperdicios
Sobreproducción
Esperas
Transporte
Inventario
Movimientos
Exceso de producción
Productos defectuosos

***Sobreproducción*:** producir más de lo que pide el consumidor o producirlo antes de tiempo (antes de que se pida) es un desperdicio. El inventario, de cualquier tipo, es normalmente un desperdicio.
***Esperas*:** el tiempo inactivo, el almacenamiento y las esperas son desperdicios (no añaden valor).

---

7 Jeff Arnold y Christy Bures, “Revisiting a Retail Challenge”, *Industrial Engineer* 35, n.º 12 (diciembre de 2003): 38-41; y Lea A. P. Tonkin, “Elgin Sweeper Company Employees Clear a Path Toward Lean Operations with Their Lean Enterprise System”, *Target* 20, n.º 2 (2004): 46-52.

Transporte**:** el traslado de materiales entre plantas, entre centros de trabajo (secciones), y manipular el material en más de una ocasión constituyen un desperdicio.
Inventarios**:** las materias primas, el trabajo en curso (WIP), los productos acabados innecesarios y un exceso de suministros para las operaciones no añaden valor.
Movimiento**:** el movimiento de equipos o personas que no añade valor es un desperdicio.
Exceso de proceso**:** el trabajo realizado en un producto que no añade valor es un desperdicio.
Productos defectuosos**:** las devoluciones, las reclamaciones por garantía, los trabajos de corrección de errores y los desechos son un desperdicio.

Desde una perspectiva más amplia, que va más allá de la producción inmediata, se puede sugerir que a menudo otros recursos, como energía, agua y aire, se desperdician, sin que sea necesario. Una producción eficiente, ética y socialmente responsable minimiza los factores productivos y maximiza la producción, sin desperdiciar nada.

EL SISTEMA JIT EN SERVICIOS

Todas las técnicas JIT relativas a proveedores, layout, inventario y programación se utilizan en el sector de servicios.

Proveedores Como hemos comentado, prácticamente todos los restaurantes se relacionan con sus proveedores mediante un sistema JIT. Los que no lo hacen no suelen tener éxito. El desperdicio es demasiado evidente: comida estropeada y quejas de los clientes.



JIT en el Hospital Arnold Palmer

Layouts Los layouts JIT son necesarios en las cocinas de los restaurantes, en las que la comida fría tiene que servirse fría y la caliente, caliente. McDonald's, por ejemplo, ha vuelto a diseñar sus cocinas con un gran gasto (*véase* el *Perfil de una empresa global* del Capítulo 9 en el volumen *Decisiones Estratégicas*) para ganar unos segundos en el proceso de producción y así aumentar la rapidez del servicio a los clientes. Gracias al nuevo proceso, McDonald's puede producir hamburguesas bajo pedido en 45 segundos. Los layouts también marcan la diferencia en la recogida de equipajes en las líneas aéreas, donde los pasajeros esperan sus equipajes justo a tiempo.

En un hospital que emplea el sistema JIT, los proveedores sirven pedidos listos para su utilización directamente a las zonas de almacenamiento, los puestos de las enfermeras y las salas de operaciones. Sólo se mantiene una reserva de 24 horas.

Inventario Todos los agentes de Bolsa reducen su inventario casi a cero. La mayor parte de las órdenes de venta y de compra se producen con una filosofía JIT porque la mayoría de los clientes no aceptan que una orden de compra o de venta no se ejecute. Un agente de bolsa puede ponerse en una situación difícil si deja postergada una orden no ejecutada. Del mismo modo, McDonald's mantiene un inventario de productos acabados de sólo diez minutos; después de ese tiempo, se tira. Los hospitales, como el hospital Arnold Palmer (que se describe en el caso de estudio en vídeo de este capítulo), también mantienen inventario JIT y unos bajos stocks de seguridad, incluso para suministros esenciales como los fármacos, mediante el desarrollo de redes comunitarias con otros Hospitales como sistemas de reserva. De este modo, si una farmacia se queda sin una medicina y la necesita, otro miembro de la red puede suministrársela hasta que le llegue el pedido del día siguiente.

Programación En los mostradores de venta de pasajes de las líneas aéreas, el enfoque de un sistema JIT se dirige a satisfacer la demanda del cliente, pero en vez de tratar de satisfacerla mediante el inventario de un producto tangible, esa demanda debe satisfacerse

mediante personal. A través de una minuciosa programación, el personal de los mostradores pone de manifiesto el justo a tiempo para satisfacer la demanda del cliente. En otras palabras, se programa el personal en vez de "cosas" inventariadas. Los programas de personal son críticos. En un salón de belleza, el enfoque es ligeramente diferente: se programa al cliente para asegurar un servicio JIT. Del mismo modo, en McDonald's, como en la mayoría de los restaurantes de comida rápida, la programación del personal se modifica cada 15 minutos en función de una previsión muy precisa de la demanda. Además, la producción se hace en pequeños lotes para garantizar que se sirven hamburguesas recién hechas y calientes justo a tiempo. En definitiva, se programan tanto el personal como la producción según los principios JIT para satisfacer una demanda concreta.

Conviene destacar que en estos tres ejemplos (el mostrador de billetes de una línea aérea, el salón de belleza y McDonald's) la programación es un ingrediente clave para un JIT eficaz. Unas buenas previsiones son la base de aquellos programas. Estas previsiones pueden ser muy elaboradas, con componentes estacionales, diarios e incluso horarios en el caso del mostrador de billetes de líneas aéreas (ventas para las vacaciones, horas de los vuelos, etcétera), con componentes estacionales y semanales en el salón de belleza (las vacaciones y los viernes presentan problemas particulares) o de unos pocos minutos en McDonald's.

Para entregar productos y servicios a los clientes ante una demanda que cambia constantemente, los proveedores tienen que ser fiables, los inventarios enjutos, los tiempos de ciclo cortos y los programas ágiles. Todos ello se está gestionando con éxito en muchas compañías independientemente de cuáles sean sus productos. Las técnicas JIT se utilizan ampliamente tanto en empresas que producen bienes como en las que producen servicios; ellas simplemente parecen diferentes.

RESUMEN

El JIT y la producción ajustada son filosofías de mejora continua. La producción enjuta parte de centrarse en los deseos del cliente, pero ambos conceptos se centran en eliminar todos los desperdicios del proceso productivo. Como el desperdicio se encuentra en todo lo que no añade valor, las organizaciones JIT y ajustadas están añadiendo valor más eficientemente que otras compañías. El desperdicio surge cuando se producen defectos en el proceso productivo o en los proveedores exteriores. El JIT y la producción ajustada combaten al espacio desperdiciado porque no favorece un layout óptimo; atacan al tiempo desperdiciado porque provoca una pobre programación; atacan al desperdicio que supone el inventario ocioso; atacan al desperdicio que significa un mal mantenimiento de la maquinaria y del equipo. La expectativa es que unos empleados comprometidos y potenciados trabajen con unos directivos y unos proveedores comprometidos para construir sistemas que respondan a los clientes con precios cada vez más bajos y con mayor calidad.



Justo a tiempo (JIT) *(p. 251)*
Producción ajustada o enjuta (*lean*) *(p. 251)*
Variabilidad *(p. 252)*
Sistema de tirar o arrastrar (*pull*) *(p. 252)*
Tiempo de ciclo de fabricación *(p. 252)*
Sistema de empujar (*push*) *(p. 252)*
Asociaciones JIT *(p. 253)*
Inventario en consignación o consigna *(p. 255)*
Inventario justo a tiempo *(p. 258)*
Programas equilibrados *(p. 263)*
Kanban *(p. 264)*
Sistema de producción de Toyota *(p. 268)*
5 S *(p. 270)*
Siete desperdicios *(p. 271)*



PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto 6.1

La empresa Krupp Refrigeration, Inc., está intentando reducir su inventario y le pide que implante un sistema kanban para los compresores en una de sus líneas de montaje. Determine el tamaño del kanban y el número de kanbans (contenedores) necesarios.

Coste de preparación = 10 dólares
Coste anual de almacenamiento por compresor = 100 dólares
Producción diaria = 200 compresores
Utilización anual = 25.000 (= 50 semanas × 5 días a la semana × consumo diario de 100 compresores)
Plazo de entrega = 3 días
Stock de seguridad = $\frac{1}{2}$ día de producción de compresores

Solución

En primer lugar debemos determinar el tamaño del contenedor kanban. Para ello, determinamos la cantidad de pedido en producción (*véase* el Capítulo 2 o la Ecuación 6.1), que determina el tamaño del kanban.

$$Q_p = \sqrt{\frac{2DS}{H\left(1 - \frac{d}{p}\right)}} = \sqrt{\frac{2(25.000)(10)}{H\left(1 - \frac{d}{p}\right)}} = \sqrt{\frac{500.000}{100\left(1 - \frac{100}{200}\right)}} = \sqrt{\frac{500.000}{50}}$$

A continuación se calcula el número de kanbans:

Demanda durante el plazo de producción = 300 (= 3 días × utilización diaria de 100)

Stock de seguridad = 100 (= $\frac{1}{2}$ día de producción × 200)

$$\text{Número de kanbans} = \frac{\text{Demanda durante el plazo de producción} + \text{Stock de seguridad}}{\text{Tamaño del contenedor}}$$

$$= \frac{300 + 100}{100} = \frac{400}{100} = 4 \text{ contenedores}$$

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.



En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas prácticos
- Visita virtual a una empresa
- Problemas en Internet

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas prácticos
- Videoclips y caso de estudio en vídeo
- Excel OM
- POM para Windows



CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. ¿Qué es el sistema JIT?
2. ¿Qué es un "productor ajustado o enjuto"?
3. ¿Qué es la programación equilibrada?
4. Dados los objetivos de las asociaciones JIT destacados en el texto, ¿cuál cree que es el más difícil de conseguir?
5. El sistema JIT intenta eliminar los retrasos, que no añaden valor. ¿Cómo puede entonces hacer frente este sistema a los problemas meteorológicos y a su impacto en la cosecha y en los tiempos de transporte?
6. ¿De qué tres maneras se relacionan JIT y calidad?
7. ¿Cómo contribuye JIT a la ventaja competitiva?
8. ¿Cuáles son las características de las asociaciones justo a tiempo con respecto a los proveedores?
9. Analice cómo la palabra japonesa que se utiliza para "tarjeta" tiene aplicación en el estudio del JIT.
10. Los contenedores normalizados y reutilizables tienen ventajas bastante evidentes para hacer envíos. ¿Cuál es el objetivo de estos dispositivos en una planta?
11. ¿Funciona el JIT en el sector servicios? Ofrezca un ejemplo.
12. ¿Qué técnicas JIT funcionan tanto en el sector manufacturero como en el sector servicios?



DILEMA ÉTICO

En este mundo JIT, en un esfuerzo por reducir los costes de manejo, acelerar las entregas y reducir los inventarios, los minoristas están obligando a sus proveedores a hacer cada vez más cosas en la forma de preparar sus mercancías para sus almacenes *cross-docking*, envíos a tiendas específicas y presentación en las estanterías. Su empresa, un pequeño fabricante de decoraciones de acuario, se encuentra en una difícil situación. Primero, Mega-Mart le pidió que desarrollase una tecnología de código de barras, después un embalaje especial, después pequeños envíos individuales con códigos de barra para cada tienda (así, cuando la mercancía llega al almacén cross-docking, se transfiere inmediatamente al correcto camión y tienda y está preparada para su colocación en la estantería). Ahora, Mega-Mart le pide que desarrolle, inmediatamente, un sistema de etiquetas de identificación por radiofrecuencia RFID. Mega-Mart ha dejado muy claro que los proveedores que no adopten esta tecnología serán eliminados.

Antes, cuando no tenía el conocimiento necesario para utilizar los códigos de barras, tuvo que pedir dinero prestado y contratar a una empresa externa para hacer el desarrollo, comprar la tecnología, y formar a su personal de envíos. Después, satisfacer la exigencia sobre los embalajes especiales le produjo una disminución en sus ingresos durante varios meses, lo que generó unas pérdidas netas al final del año. Ahora parece que la exigencia sobre las etiquetas IRF es imposible de cumplir. Su negocio, en el mejor de los casos, apenas es rentable, y es posible que el banco no quiera volver a sacarle de apuros. A lo largo de los años, Mega-Mart se ha ido convirtiendo poco a poco en su principal cliente y, sin él, usted probablemente deberá cerrar el negocio. ¿Cuáles son los problemas éticos y qué va a hacer?



PROBLEMAS*

•

6.1. Leblanc Electronics, Inc., en Nahsville, produce pequeños lotes de escáneres de ondas aéreas a medida para la industria de defensa. El propietario de la empresa, Larre Leblanc, le pide que reduzca el inventario introduciendo un sistema kanban. Después de varias horas de análisis determina los siguientes datos sobre los conectores del escáner utilizados en una célula de trabajo. ¿Cuántos kanbans necesita para este conector?

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; X significa que se puede resolver el problema con Excel OM; PX significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

Demanda diaria	1.000 conectores
Plazo de producción	2 días
Existencias de seguridad	1/2 día
Tamaño del kanban	500 conectores

6.2. La empresa Ghip Gillikin quiere establecer kanbans para alimentar una nueva célula de trabajo. Se dispone de los siguientes datos. ¿Cuántos kanbans hacen falta?

Demanda diaria	250 unidades
Plazo de producción	1/2 día
Existencias de seguridad	1/4 día
Tamaño del kanban	50 unidades

6.3. Chris Millikan Manufacturing, Inc., está estableciendo un sistema kanban para suministrar a sus líneas de montaje de centrales telefónicas. Determine el tamaño del kanban para los submontajes y el número de kanbans que hacen falta.

Coste de preparación = 30 dólares
Coste de almacenamiento anual del subconjunto = 120 dólares por subconjunto
Producción diaria = 20 subconjuntos
Utilización anual = 2.500 (= 50 semanas × 5 días por semana × utilización diaria de 10 subconjuntos)
Plazo de producción = 16 días
Existencias de seguridad = 4 día de producción de subconjuntos

6.4. Maggie Moylan Motorcycle Corp. utiliza kanbans para suministrar a su cadena de montaje de transmisiones. Determine el tamaño del kanban para el conjunto del eje principal y el número de kanbans necesarios.

Coste de preparación = 20 dólares
Coste de almacenamiento anual del conjunto del eje principal = 250 dólares por unidad
Producción diaria = 300 ejes principales
Utilización anual = 20.000 (= 50 semanas × 5 días por semana × utilización diaria de 80 ejes principales)
Plazo de producción = 3 días
Existencias de seguridad = 1/2 día de producción de ejes principales

6.5. Discount-Mart, un importante detallista de la costa Este de Estados Unidos, quiere calcular la cantidad económica de pedido (*véase* el Capítulo 2 para las fórmulas EOQ) para sus bombillas halógenas. Actualmente compra todas las bombillas halógenas a la empresa Specialty Lighting Manufacturers, de Atlanta. La demanda anual es de 2.000 bombillas, el coste de emisión de pedidos es de 30 dólares por pedido, y el coste de almacenamiento es 12 dólares por bombilla.

a) ¿Cuál es la cantidad de pedido económica (EOQ)?
b) ¿Cuál es el coste anual total de almacenamiento y de emisión de pedidos?
c) ¿Cuántos pedidos deberá hacer Discount-Mart a Specialty Lighting Manufacturers cada año?

6.6. Discount-Mart (*véase* el Problema 6.5) como parte de su nuevo programa JIT, ha firmado un contrato a largo plazo con Specialty Lighting Manufacturers y emitirá sus pedidos de bombillas halógenas electrónicamente. El coste de emisión de pedidos se reducirá a 0,50 dólares por pedido, pero Discount-Mart también ha reexaminado sus costes de almacenamiento y los ha elevado a 20 dólares por cada bombilla.

a) ¿Cuál es la nueva cantidad económica de pedido?
b) ¿Cuántos pedidos habrá que hacer al año?
c) ¿Cuál es el coste anual total con esta nueva política?

6.7. ¿Cómo sus respuestas a los Problemas 6.5 y 6.6 proporcionan la oportunidad de entender una estrategia de compras JIT?

6.8. Bill Penny tiene una planta de fabricación repetitiva que produce enganches de remolques en Arlington, Texas. La fábrica tiene una rotación media de inventario de tan sólo 12 veces al año. Por ello, ha decidido que va a reducir el tamaño de los lotes de componentes. Ha calculado los siguientes datos para un componente, el clip de la cadena de seguridad:

Demanda anual = 31.200 unidades
Demanda diaria = 120 unidades
Producción diaria = 960 unidades
Tamaño de lote deseado (1 hora de producción) = 120 unidades
Coste de almacenamiento anual por unidad = 12$
Coste de la mano de obra de preparación por hora = 20$

¿Cuántos minutos de tiempo de preparación tiene que establecer como objetivo a su director de la planta para este componente?

6.9. Dada la siguiente información sobre un producto en la empresa de Phyllis Simon, ¿cuál es el tiempo de preparación adecuado?

Demanda anual = 39.000 unidades
Demanda diaria = 150 unidades
Producción diaria = 10.000 unidades
Tamaño de lote deseado (1 hora de producción) = 150 unidades
Coste de almacenamiento anual por unidad = 10$
Coste de la mano de obra de preparación por hora = 40$

6.10. Rick Wing tiene una planta de fabricación repetitiva que produce volantes de automóviles. Utilice los siguientes datos para calcular un tamaño de lote reducido. La empresa utiliza un año laboral de 305 días.

Demanda anual de volantes	30.500
Demanda diaria	100
Producción diaria	800
Tamaño de lote deseado (2 horas de producción)	200
Coste de almacenamiento anual por unidad	10$

a) ¿Cuál es el coste de preparación, basándose en el tamaño de lote deseado?
b) ¿Cuál es el tiempo de preparación, suponiendo un coste de la mano de obra de preparación de 40 dólares por hora?



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: 6.11 y 6.12.

■ *Caso de estudio* ■

Mutual Insurance Company de Iowa

Mutual Insurance Company de Iowa (MICI) tiene una sede principal para seguros en Des Moines, Iowa. La oficina de Des Moines tiene la responsabilidad de procesar todas las reclamaciones sobre seguros de todos sus clientes en Estados Unidos. Las ventas de la empresa han experimentado un rápido crecimiento durante el último año y, como era de esperar, se ha recibido un número récord de reclamaciones. Todos los días se reciben más de 2.500 formularios de reclamaciones en la oficina. Desgraciadamente, cada día se resuelven menos de 2.500 reclamaciones. El tiempo total para procesar una reclamación, desde el momento en que llega hasta que se envía un cheque por correo, ha pasado de 10 días a 10 semanas. Por ello, algunos clientes están amenazando con emprender acciones legales. Sally Cook, directora de procesamiento de reclamaciones, está muy preocupada porque sabe que el tiempo que en realidad se tarda en tramitar cada reclamación raramente es superior a 3 horas de trabajo real. Con los actuales procedimientos administrativos, las limitaciones de recursos humanos y las restricciones de instalaciones de la oficina, no parece que sea fácil resolver el problema. Pero está claro que hay que hacer algo, porque la carga de trabajo está sobrepasando al sistema actual.

La dirección de MICI quiere que se tomen medidas drásticas, pero al mismo tiempo económicas, para resolver el problema. La señora Cook ha decidido intentar una solución JIT para el proceso de las reclamaciones. Con el apoyo de sus superiores, y como una solución temporal, Cook ha traído personal a tiempo parcial de las divisiones de ventas de todo el país. Este personal está para reducir las reclamaciones pendientes mientras se pone en marcha el nuevo sistema JIT.

Mientras tanto, los directores de procesamiento de reclamaciones y los empleados van a ser formados en los principios JIT. Teniendo en cuenta estos principios, los directivos rediseñarán los trabajos para trasladar las responsabilidades de control de la calidad a cada uno de los empleados, haciéndoles responsables de la calidad del trabajo y de cualquier medida correctiva necesaria. Cook va a emprender también unos programas de formación de los empleados para explicarles todo el flujo del proceso de reclamaciones, así como para proporcionarles una completa formación en cada paso del proceso. También se enseñará a los empleados y a los directivos las habilidades para la introducción de datos en un esfuerzo para atribuir la responsabilidad de la exactitud de los datos a la persona que los procesa, en vez de al personal de introducción de datos. Además, se hará hincapié en la formación en diferentes funciones (multifuncional), para permitir que los trabajadores de los departamentos puedan procesar de principio a fin diferentes tipos de solicitudes de reclamación de los clientes.

Cook y sus supervisores también están estudiando los formularios de seguros y de reclamaciones que se utilizan actualmente. Quieren ver si estandarizando los formularios se puede reducir el tiempo de procesamiento, reducir el tiempo de introducción de datos y disminuir el trabajo en curso.

Esperan que los cambios que van a introducir reduzcan también el tiempo de formación. La introducción de estos cambios en los métodos de trabajo y en las capacidades de los trabajadores llevará lógicamente a la necesidad de cambios en el layout del departamento de procesamiento de reclamaciones. Este cambio potencial representa un cambio importante sobre el layout que tenía el departamento hasta ahora, y tendrá un coste importante. Para asegurar el éxito de la implementación de esta fase del cambio, Cook formó un equipo compuesto por supervisores, empleados y un asesor externo de layout de oficinas. También ha enviado al equipo a visitar la planta de fabricación de motocicletas de Kawasaki en Lincoln, Nebraska, para observar su utilización de las células de trabajo para ayudar al JIT.

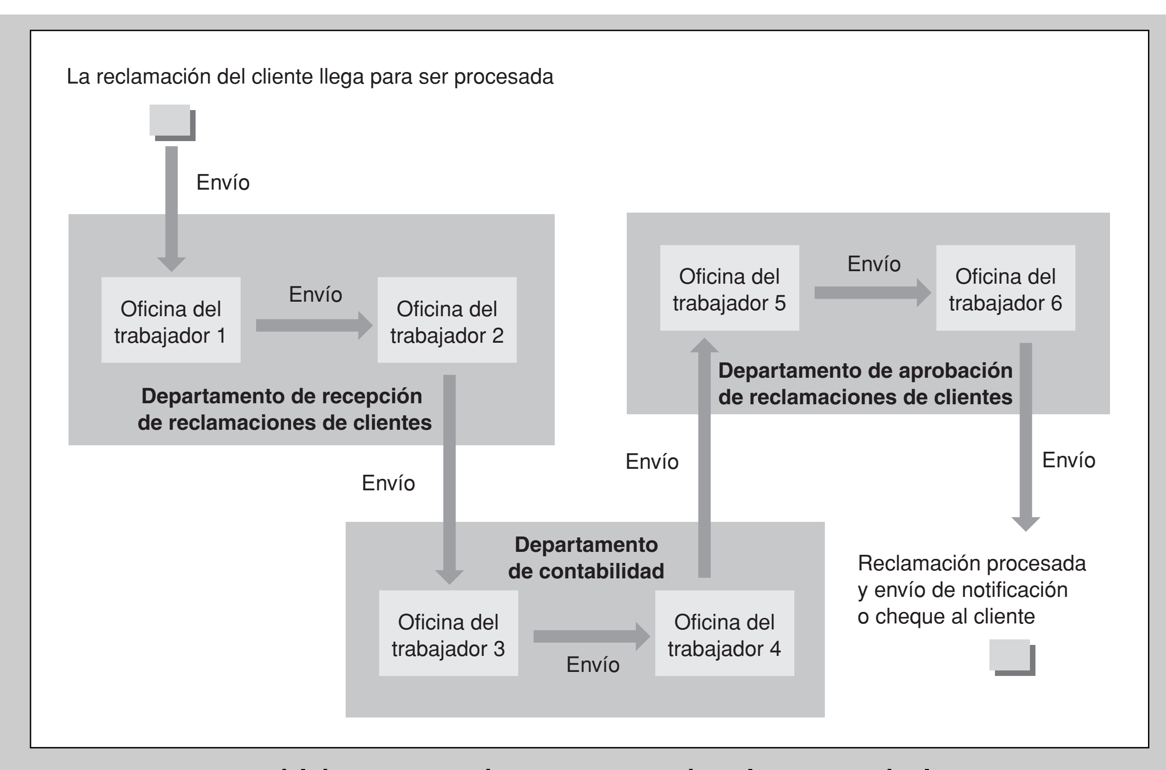


FIGURA 6.8 ■ Layout del departamento de procesamiento de reclamaciones de clientes

El equipo concluyó que era necesario un cambio en el layout de la oficina para implantar con éxito los conceptos JIT en MICI. El equipo cree que se debe revisar el layout de la operación y los métodos de trabajo para que se ajusten con el layout de las "células de tecnología de grupo". En la Figura 6.8 se presenta un esquema del actual layout departamental y del modelo de flujo de proceso de las reclamaciones. Como puede verse en esta figura, las reclamaciones de los clientes llegan a la sede para su procesamiento y pasan a través de una serie de oficinas y de departamentos hasta completar el proceso de la reclamación. Aunque la disposición de las oficinas y de los trabajadores en la Figura 6.6 es la típica, la instalación en realidad gestiona otros 20 flujos, cada uno de los cuales pasa por los tres departamentos. Sin embargo, no todos los 20 flujos se configuran de la misma manera. El número de empleados, por ejemplo, varía dependiendo de las necesidades del formulario de reclamación (las reclamaciones de mayor volumen económico tienen que ser aprobadas por más personas). Así, mientras que todos los formularios deben pasar por los tres mismos departamentos (Recepción de reclamaciones de clientes, Contabilidad y Aprobación de reclamaciones de clientes), el número de trabajadores por cada reclamación puede variar entre dos y cuatro. Por ello, la instalación de MICI tiene actualmente un total de 180 oficinistas sólo para procesar las reclamaciones. Todo este personal trabaja a las órdenes de la señora Cook.

Preguntas para el debate

1. Identifique las características que espera que tenga el departamento de proceso de reclamaciones de MICI una vez que se haya puesto en marcha el sistema JIT.
2. ¿Cómo debería ser el reestructurado layout en célula para el proceso de reclamaciones de la Figura 6.8? Dibújelo.
3. ¿Qué supuestos se hacen respecto al personal y al equipo en el nuevo layout de célula de tecnología de grupo?
4. ¿Cómo beneficiará al funcionamiento de MICI el nuevo sistema orientado a JIT? Explíquelo.

Fuente: Adaptado de Marc J. Schniederjans, *Topics In Just-In-Time Management,* pp. 283-285. Reproducido con permiso de Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.

■ *Caso de estudio* ■

JIT después del incendio

Toyota Motor Company, de reconocido prestigio mundial, tiene presencia en todo el mundo, y sus inversiones en Norteamérica representan por sí solas más de 12.000 millones de dólares en 10 plantas de fabricación. Toyota está a la cabeza de las empresas ajustadas y es un ejemplo de sistema JIT. Ejecutivos de todo el mundo visitan las fábricas de Toyota para ver cómo funciona el sistema JIT.

Pero a primera hora de un sábado del mes de febrero un incendio arrasó la enorme fábrica Aisin Seiki en Karina, Japón. El incendio destruyó la principal fuente de las críticas válvulas de freno que Toyota compra a Aisin y que utiliza en la mayoría de sus automóviles. Aisin lleva muchos años siendo la proveedora de las esenciales válvulas de provisión de líquido de frenos (válvulas P), suministrando el 99 por ciento de las necesidades de esta válvula para Toyota. Aproximadamente el 80 por ciento de la producción total de Aisin se destina a Toyota. Cuando se disipó el humo fue evidente la gravedad del desastre: la mayoría de las 506 máquinas especiales utilizadas para fabricar las válvulas P no servían para nada. Se podrían arreglar unas pocas en dos semanas, pero habría que sustituir la mayoría, y el plazo de entrega era de 6 semanas. Tanto Aisin como Toyota habían estado funcionando a plena capacidad.

De forma coherente con sus prácticas JIT, Toyota sólo tenía reservas de la válvula para 4 horas. Y no había muchas más en la cerrada red que constituye la cadena de suministros de Toyota. Depender de una única fuente y mantener poco inventario supone un riesgo, pero ello también mantiene a Toyota ajustada y sus costes bajos. Las fábricas de Toyota en Japón fabrican 14.000 automóviles al día. Sin la válvula, la producción se detendría rápidamente. Además, los directores de producción de Toyota estaban consternados al descubrir que necesitaban 200 variantes de la válvula P.

Consecuente con las redes *keiretsu* que son típicas del sistema manufacturero japonés, Toyota posee el 23 por ciento del capital de Aisin, y el presidente de Aisin es Kanshiro Toyoda, de la familia Toyoda que fundó la empresa de automóviles. Kosuke Ikebuchi, un alto ejecutivo de Toyota, fue localizado a las ocho de la mañana en una partida de golf en su club y se le comunicaron las malas noticias.

Preguntas para el debate

1. Si fuera usted el señor Ikebuchi, ¿qué haría?
2. ¿Qué le enseña esta experiencia (y a Aisin y a Toyota) sobre los sistemas JIT?
3. Si hubiera estado a cargo de los suministros JIT de DaimlerChrysler en la mañana del 11 de septiembre de 2001, ¿qué medidas habría tomado?

Fuentes: El caso está basado en lo publicado en *The Wall Street Journal* (13 de septiembre de 2001): B3, (8 de mayo de 1997): A1, A5, y (24 de septiembre de 2001): B1, B4; y *Harvard Business Review* (septiembre-octubre de 1999): 97-106.



Caso de estudio en vídeo

El sistema JIT en el Hospital Arnold Palmer

El Hospital Arnold Palmer de Orlando, fundado en 1989, está especializado en el tratamiento de mujeres y niños y es reconocido por sus altas calificaciones en calidad (de los primeros de un 10 por ciento de los 2.000 hospitales calificados), su volumen de partos (más de 10.000 partos anuales, y en aumento) y su unidad de cuidados intensivos neonatal (la quinta en tasas de supervivencia en todo Estados Unidos). Pero las prácticas médicas de calidad y la elevada satisfacción de los pacientes requieren un costoso inventario, unos 30 millones de dólares al año, y miles de SKU* (unidad de mantenimiento de inventario o código de stock de un artículo). Con la presión puesta en la atención médica,

para gestionar y reducir los costes, el hospital Arnold Palmer se ha enfocado hacia el control de su inventario con técnicas justo a tiempo (JIT).

Por ejemplo, ahora dentro del hospital los medicamentos se distribuyen en las estaciones de trabajo de las enfermeras mediante máquinas expendedoras que permiten hacer un seguimiento electrónico de la utilización por cada paciente y cargan el coste a cada paciente. Las estaciones expendedoras se reabastecen todas las noches, en función de la demanda de los pacientes y de las recetas extendidas por los doctores.

Para encarar los temas JIT con la ayuda de un tercero, el hospital Arnold Palmer se dirigió a un importante socio de distribución, McKesson General Medical, que, como proveedor de primer nivel, suministra al hospital casi la cuarta parte de todo su inventario médico-quirúrgico. McKesson provee esponjas, bateas, toallas, mantas, jeringuillas y cientos de otros artículos médico-quirúrgicos. Para asegurar una entrega diaria coordinada del inventario comprado a McKesson se ha asignado a un ejecutivo de cuentas y a dos administrativos a tiempo completo al hospital. El resultado ha sido una disminución del inventario diario medio de 400.000 a 114.000 dólares desde el uso de JIT.

El éxito del JIT también se ha logrado en el campo de los *packs quirúrgicos personalizados*. Los packs quirúrgicos personalizados son las tallas y sábanas estériles, las bandejas de plástico desechables, gasas y demás, especializadas para cada procedimiento quirúrgico. El hospital Arnold Palmer utiliza 10 packs personalizados distintos para diversos procedimientos quirúrgicos. "Se utilizan más de 50.000 packs cada año, con un coste total de 1,5 millones de dólares", comenta George DeLong, director de la gestión de la cadena de suministros.

Estos packs no sólo se entregan con un sistema JIT, sino que también se empaquetan de esta manera. Es decir, se empaquetan en orden inverso a como se utilizan, de forma que cada artículo salga del paquete en la secuencia necesaria. Los packs son voluminosos, caros, y deben permanecer esterilizados. Reducir el inventario y manipular estos packs, al mismo tiempo que se mantiene asegurado un suministro estéril para las cirugías programadas, es un reto para los hospitales.

He aquí cómo funciona la cadena de suministros: los packs personalizados son *montados* por una empresa empaquetadora con *componentes* suministrados principalmente por fabricantes seleccionados por el hospital y *entregados* por McKesson desde su almacén local. El hospital Arnold Palmer trabaja con su propio personal quirúrgico para identificar y estandarizar los packs personalizados para reducir el número de SKU (códigos de stock) de packs personalizados. Con este sistema integrado se ha reducido el inventario de seguridad de los packs a un día.

El procedimiento para dirigir el sistema JIT de los packs quirúrgicos personalizados empieza con un "tirón o arrastre" del programa diario de cirugía de los doctores. A continuación el hospital lanza diariamente un pedido electrónico a McKesson entre la una y las dos de la tarde. A las cuatro de la madrugada del día siguiente McKesson entrega los packs. El personal del hospital llega a las siete de la mañana y llena los estantes para las cirugías programadas. McKesson vuelve a pedir a la empresa empaquetadora, que a su vez "tira o arrastra" de los fabricantes el necesario inventario para la cantidad de paquetes requeridos.

El sistema JIT del hospital Arnold Palmer reduce la inversión en inventario, los caros pedidos tradicionales y el almacenamiento voluminoso, y respalda la calidad con un servicio estéril.

Preguntas para el debate**

1. ¿Qué recomienda que se haga cuando se descubre un error en un paquete que se abre para una operación?
2. ¿Cómo se puede mejorar el procedimiento descrito aquí sobre los packs quirúrgicos personalizados?
3. Cuando se analiza el sistema JIT aplicado en los servicios, el texto dice que se utiliza con los proveedores, el layout, el inventario y la programación. Ofrezca un ejemplo de cada uno en el caso del hospital Arnold Palmer.
4. Cuando un doctor propone un nuevo procedimiento quirúrgico, ¿cómo recomendaría que el SKU del nuevo paquete personalizado se introduzca en el sistema de la cadena de suministros del hospital?

* SKU = código de stock de un artículo (*stock keeping unit*)
** Puede que quiera ver este caso en vídeo en su CD antes de responder a las preguntas.

Fuente: Redactado por los profesores Barry Render (Rollins College), Jay Heizer (Texas Lutheran University) y Beverly Amer (Northern Arizona University).

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Harvard ha seleccionado estos casos de la Harvard Business School para acompañar este capítulo (textbookcasematch.hbsp.harvard.edu):

- **Johnson Controls Automotive Systems Group: la fábrica de Georgetown, Kentucky.** (#693-086): Analiza el reto del JIT con una variación creciente y un cambio de entrega JIT a ensamblaje JIT.
- **Injex Industries** (#697-003): Analiza los problemas de un proveedor como Injex que suministra componentes a un único y exigente cliente con un sistema JIT.



BIBLIOGRAFÍA

Ahls, Bill. "Advanced Memory y Lean Change". *IIE Solutions* 33, n.º 1 (enero 2001): pp. 40-42.

Bacheldor, Beth, y Laurie Sullivan. "Never Too Lean". *Information Week* 985 (19 de abril, 2004): pp. 36-42.

Bruun, Peter, y Robert N. Mefford. "Lean Production and the Internet". *International Journal of Production Economics* 89, n.º 3 (18 de junio, 2004): p. 247.

Burke, Robert, y Gregg Messel. "From Simulation to Implementation: Cardinal Health's Lean Journey". *Target: Innovation at Work* 19, n.º 2 (segundo trimestre 2003): pp. 27-32.

Denton, Brian, Diwakar Gupta, y Keith Jawahir. "Managing Increasing Product Variety at Integrated Steel Mills". *Interfaces* 33, n.º 2 (marzo-abril 2003): pp. 41-53.

Drexl, Andreas, y Kimms Alf. "Sequencing JIT Mixed-Model Assembly Lines Under Station-Load and Part-Usage Constraints". *Management Science* 47, n.º 3 (marzo 2001): pp. 480-491.

Hall, Robert W. 'Lean' y the Toyota Production System". *Target* 20, n.º 3 (third issue 2004): pp. 22-27.

Keyte, Beau, y Drew Locher. *The Complete Lean Enterprise*. University Park, IL: Productivity Press, 2004.

King, Andrew A., y Michael J. Lenox. "Lean and Green? An Empirical Examination of the Relationship Between Lean Production and Environmental Performance". *Production and Operations Management* 10, n.º 3 (fall 2001): pp. 244-256.

Parks, Charles M. "The Bare Necessities of Lean". *Industrial Engineer* 35, n.º 8 (agosto 2003): p. 39.

van Veen-Dirks, Paula. "Management Control and the Production Environment". *International Journal of Production Economics* 93 (8 de enero, 2005): p. 263.

White, Richard E., y John N. Pearson. "JIT, System Integration and Customer Service". *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 31, n.º 5 (2001): pp. 313-333.



RECURSOS EN INTERNET

Business Open Learning Archive, United Kingdom:
http://sol.brunel.ac.uk/~bustefj/bola

Gemba Research:
http://www.gemba.com

Kanban—An Integrated JIT System:
http://www.geocities.com/TimesSquare/1848/japan21.html

Manufacturing Engineering:
http://www.mfgeng.com/

Mid-America Manufacturing Technology Center:
http://www.mamtc.com/

Pelion systems, Inc.:
http://www.pelionsystems.com/whatisleanflow.ASP

MANTENIMIENTO Y FIABILIDAD

7

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando haya completado este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Mantenimiento
- Tiempo medio entre fallos
- Redundancia
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento correctivo
- Mortalidad infantil

Describir o explicar:

- Cómo medir la fiabilidad de un sistema
- Cómo mejorar el mantenimiento
- Cómo evaluar el rendimiento del mantenimiento

PERFIL DE UNA EMPRESA GLOBAL: ORLANDO UTILITIES COMMISSION (LA COMISIÓN DE SUMINISTROS ELÉCTRICOS DE ORLANDO)

El mantenimiento proporciona una ventaja competitiva a Orlando Utilities Commission

En la Central de Energía de Stanton en Orlando se llevan a cabo periódicamente trabajos de mantenimiento tales como la revisión de las turbinas. Las puntas de las aspas de estas turbinas se desplazan a velocidades supersónicas de más de 2.000 kilómetros por hora cuando la central está en funcionamiento. Una fisura en una de las aspas podría provocar un fallo catastrófico.

El mantenimiento de instalaciones intensivas en capital exige tener una buena planificación para minimizar el tiempo de inactividad. Aquí se está realizando la revisión de una turbina. Organizar los miles de conjuntos y piezas necesarios para un paro supone un gran esfuerzo.

La Orlando Utilities Commission (OUC) es propietaria y explotadora de dos centrales eléctricas que suministran electricidad a los dos condados centrales de Florida. Cada año, la OUC desconecta del sistema a cada una de sus unidades de generación de electricidad para realizar trabajos de mantenimiento durante un periodo una a tres semanas.

Además, cada unidad también se desconecta cada tres años para una revisión general y para una inspección de la turbina del generador. Las revisiones globales se programan para la primavera y el otoño, cuando el tiempo es más benigno y la demanda de electricidad es baja. Estas revisiones duran de seis a ocho semanas.

Las unidades de la Central de Energía de Stanton de la OUC exigen que el personal de mantenimiento realice aproximadamente 12.000 trabajos de reparación y mantenimiento preventivo al año. Para lograr realizar estas tareas eficientemente, muchos de estos trabajos son programados mediante un sistema de gestión del mantenimiento informatizado. El sistema genera las órdenes de trabajo del mantenimiento preventivo y lista los materiales necesarios.

Cada día que una planta está desconectada por mantenimiento cuesta a la OUC unos 110.000 dólares extras por el coste de sustitución del suministro de electricidad que debe generarse en otra parte. Sin embargo, estos costes son insignificantes comparados con un corte imprevisto. Un apagón imprevisto podría costar a la OUC entre 350.000 y 600.000 dólares más al día.

Las revisiones programadas no son fáciles; en cada una hay que realizar 1.800 tareas distintas y requieren 72.000 horas de mano de obra. Pero el valor del mantenimiento preventivo quedó ilustrado con la primera revisión de un nuevo generador de turbina. Los trabajadores descubrieron que había un aspa del rotor agrietada que podía haber destruido un equipo de 27 millones de dólares. Para localizar estas grietas, que son invisibles a simple vista, los metales se examinan con pruebas de contraste, rayos X y ultrasonidos.

En la OUC el mantenimiento preventivo vale su peso en oro. Por ello, el sistema de distribución eléctrica de la OUC ha sido clasificada como el número uno del Sudeste estadounidense por PA Consulting Group, una empresa líder en consultoría. El mantenimiento eficaz proporciona una ventaja competitiva para Orlando Utilities Commission.

LA IMPORTANCIA ESTRATÉGICA DEL MANTENIMIENTO Y LA FIABILIDAD

Los directivos de la Orlando Utilities Commission, y los de cualquier otra organización, deben evitar los resultados indeseables de un fallo en sus equipos. Los resultados de un fallo pueden ser perjudiciales, inoportunos, un despilfarro, y caros tanto en dólares como, incluso, en vidas. Los fallos en las máquinas y en los productos pueden tener efectos de gran alcance en las operaciones de una empresa, en su reputación y en su rentabilidad. En plantas complejas y muy mecanizadas, un proceso fuera de los niveles de tolerancia, o la avería de una máquina, pueden provocar el paro de empleados y de instalaciones, la pérdida de clientes y de prestigio, y la transformación de los beneficios en pérdidas. En una oficina, un fallo en un generador, en un sistema de aire acondicionado, o en una computadora, puede provocar la interrupción de las operaciones. Una buena estrategia de mantenimiento y de fiabilidad protege el rendimiento y las inversiones de una empresa.

El objetivo del mantenimiento y de la fiabilidad es mantener la capacidad del sistema al mismo tiempo que se controlan los costes. Un buen sistema de mantenimiento elimina la variabilidad del sistema. Los sistemas se deben diseñar y mantener para alcanzar el rendimiento esperado y los estándares de calidad. El **mantenimiento** incluye todas las actividades involucradas en conseguir que los equipos del sistema productivo estén en buen estado de funcionamiento. La **fiabilidad** es la probabilidad de que un componente de una máquina o un producto funcionen correctamente durante un periodo de tiempo determinado bajo unas condiciones establecidas.

Walt Disney Company y United Parcel Service son dos empresas que reconocen la importancia estratégica del mantenimiento. Disney World, en Florida, no tolera los fallos ni las averías. La reputación de Disney no sólo hace que sea uno de los destinos vacacionales más importantes, sino que también es la meca de los equipos de benchmarking que quieren estudiar sus prácticas de mantenimiento y fiabilidad.

Asimismo, la célebre estrategia de mantenimiento de UPS mantiene operativos y pareciendo como nuevos a sus vehículos de entrega durante 20 años o más. El programa de UPS involucra a conductores entregados a su trabajo y que conducen el mismo camión cada día, y a mecánicos también entregados a su trabajo que mantienen al mismo grupo de vehículos. Conductores y mecánicos son responsables del rendimiento de cada vehículo, y están continuamente en contacto.

La interdependencia de operario, máquina y mecánico es el sello característico de un mantenimiento y una fiabilidad de éxito. Como muestra la Figura 7.1, lo que hace que Disney y UPS tengan éxito no son sólo sus procedimientos de mantenimiento y fiabilidad, sino también la implicación de sus empleados.

En este capítulo vamos a examinar cuatro tácticas para mejorar la fiabilidad y el mantenimiento, no sólo de los productos y de los equipos, sino también de los sistemas que los producen. Estas cuatro tácticas están ordenadas por fiabilidad y por mantenimiento.

Las tácticas de fiabilidad son:

1. Mejora de los componentes individuales
2. Proporcionar redundancia

Las tácticas de mantenimiento son:

1. Poner en práctica o mejorar el mantenimiento preventivo
2. Aumentar las capacidades de reparación o la rapidez

DIEZ DECISIONES ESTRATÉGICAS DE DIRECCIÓN DE OPERACIONES

- Diseño de bienes y servicios
- Gestión de la calidad
- Estrategia de procesos
- Estrategias de localización
- Estrategias de layout
- Recursos humanos
- Dirección de la cadena de suministros
- Gestión del inventario
- Programación
- **Mantenimiento**

Mantenimiento
Todas las actividades involucradas en conseguir que los equipos del sistema productivo estén en buen estado de funcionamiento.

Fiabilidad
Probabilidad de que un componente de una máquina o un producto funcionen correctamente durante un periodo de tiempo determinado bajo unas condiciones establecidas.

La variabilidad corrompe los procesos y genera desperdicios. El director de operaciones debe suprimir la variabilidad: diseñar para lograr la fiabilidad y la gestión del mantenimiento son ingredientes esenciales para conseguirlo.

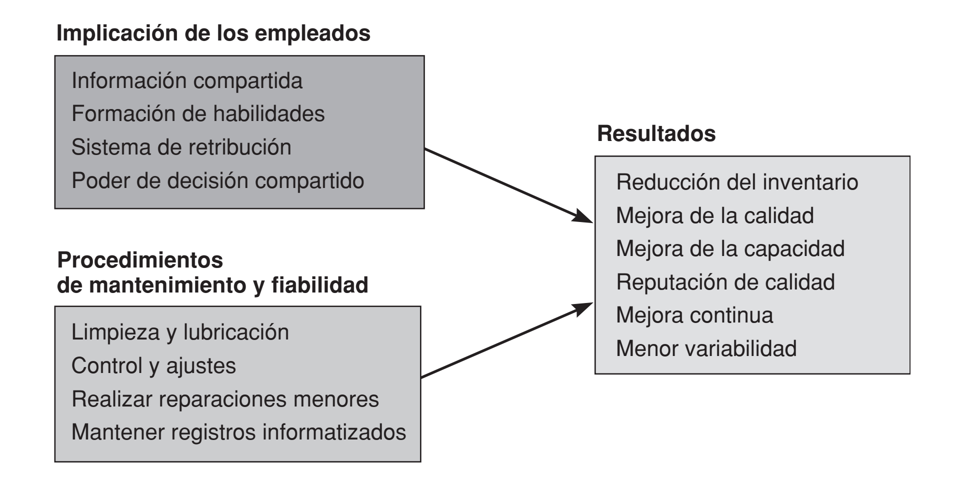


FIGURA 7.1 ■ Una buena estrategia de mantenimiento y fiabilidad requiere la implicación de los empleados y buenos procedimientos

FIABILIDAD

Los sistemas se componen de una serie de componentes individuales interrelacionados, cada uno desempeñando una función determinada. Si, por cualquier motivo, *uno* de los componentes falla al realizar su función, puede fallar la totalidad del sistema (por ejemplo, un avión o una máquina).

Mejora de los componentes individuales

Como los fallos ocurren en el mundo real, comprender su frecuencia es un importante concepto de fiabilidad. Vamos a analizar el impacto de los fallos en serie. La Figura 7.2 muestra que, cuando aumenta el número de componentes en serie, desciende rápidamente la fiabilidad de todo el sistema. Un sistema de $n = 50$ partes interrelacionadas, cada una con un 99,5 por ciento de fiabilidad, tiene una fiabilidad total del 78 por ciento. Si el sistema o la máquina tienen 100 partes interrelacionadas, cada una con una fiabilidad individual del 95,5 por ciento, ¡la fiabilidad total será tan sólo del 60 por ciento!

Para medir la fiabilidad en un sistema en el que cada parte individual o componente puede tener su propio índice de fiabilidad, no podemos utilizar la curva de fiabilidad de la Figura 7.2. Sin embargo, el método para calcular la fiabilidad de un sistema (R_s) es sencillo. Consiste en calcular el producto de las fiabilidades de los componentes individuales de la siguiente manera:

$$R_s = R_1 \times R_2 \times R_3 \times ... \times R_n \qquad \textbf{(7.1)}$$

donde R_1 = fiabilidad del componente 1
R_2 = fiabilidad del componente 2

y así sucesivamente.

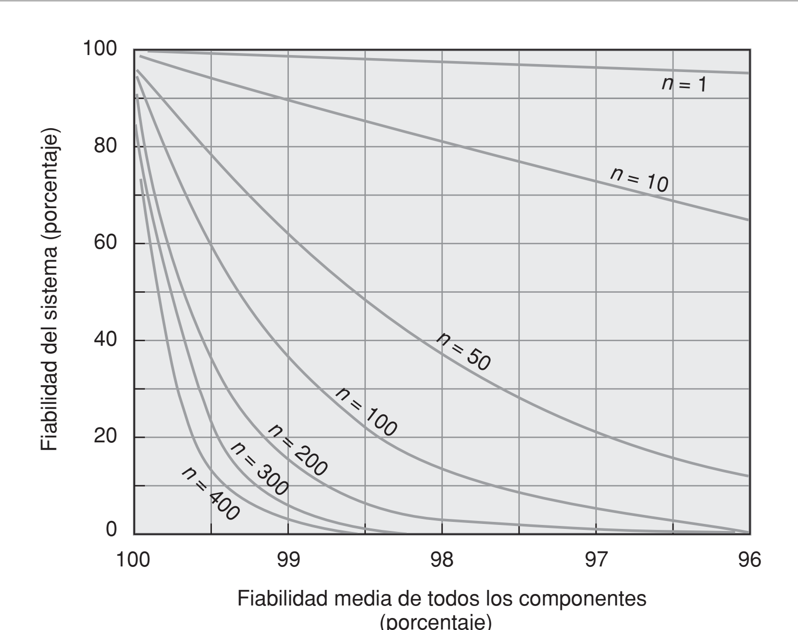


FIGURA 7.2 ■ Fiabilidad total de un sistema en función del número de componentes y de la fiabilidad de los componentes con los componentes dispuestos en serie

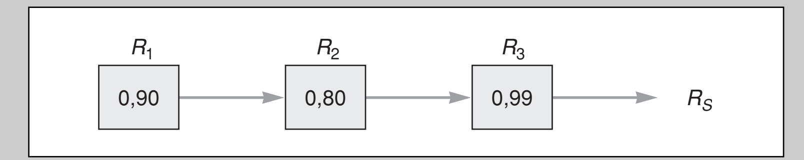
La Ecuación (7.1) supone que la fiabilidad de un componente individual no depende de la fiabilidad de los otros componentes (es decir, cada componente es independiente). Además, en esta ecuación, como en la mayor parte de las discusiones sobre fiabilidad, ésta se expresa en términos de *probabilidades*. Por tanto, una fiabilidad del 0,90 significa que la unidad funcionará como está previsto, es decir, bien, el 90 por ciento del tiempo. También significa que fallará $1 - 0{,}90 = 0{,}10 =$ el 10 por ciento del tiempo. Podemos utilizar este método para evaluar la fiabilidad de un servicio o de un producto, como veremos en el Ejemplo 1.

La fiabilidad de un componente suele ser una cuestión de diseño o de especificación, cuya responsabilidad recae sobre el personal de diseño de ingeniería. Sin embargo, el personal de compras tiene que ser capaz de mejorar los componentes del sistema manteniéndose al corriente de los productos del proveedor y de los esfuerzos de investigación. El per-

EJEMPLO 1

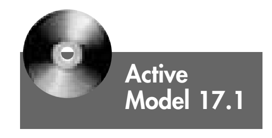
Fiabilidad en serie

El Banco Nacional de Greeley, Colorado, procesa las solicitudes de préstamos a través de tres empleados dispuestos en serie:



Si la fiabilidad de los empleados es 0,90, 0,80 y 0,99, entonces la fiabilidad del proceso de créditos es:

$$R_s = R_1 \times R_2 \times R_3 = (0{,}90)(0{,}80)(0{,}99) = 0{,}713 \text{ o } 71{,}3 \text{ por ciento}$$



El Ejemplo 1 se ilustra con más detalle en el ejercicio Active Model 17.1 del CD-ROM.

sonal de compras puede también intervenir directamente en la evaluación del rendimiento de los proveedores.

La unidad de medida básica de la fiabilidad es el *índice o tasa de fallos del producto* (FR: *Failure Ratio*). Las empresas que fabrican equipos de alta tecnología suelen proporcionar los datos del índice de fallos de sus productos. Como muestran las Ecuaciones (7.2) y (7.3), la tasa de fallos mide el porcentaje de fallos entre el número total de los productos examinados, FR(%), o el número de fallos durante un determinado periodo de tiempo, FR(N).

$$\text{FR}(\%) = \frac{\text{Número de fallos}}{\text{Número de unidades probadas}} \times 100\% \qquad \textbf{(7.2)}$$

$$\text{FR}(N) = \frac{\text{Número de fallos}}{\text{Número de horas de tiempo funcionando}} \qquad \textbf{(7.3)}$$

Tiempo medio entre fallos (MTBF)
Tiempo esperado entre una reparación y el siguiente fallo de un componente, máquina, proceso o producto.

Quizá la expresión más común en el análisis de fiabilidad es el **tiempo medio entre fallos** (*mean time between failures,* MTBF), que es la inversa de FR(N):

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\text{FR}(N)} \qquad \textbf{(7.4)}$$

En el Ejemplo 2 vamos a calcular el porcentaje de fallos FR(%), el número de fallos FR(N), y el tiempo medio entre fallos (MTBF)

EJEMPLO 2

Cálculo del tiempo medio entre fallos

Veinte sistemas de aire acondicionado diseñados para ser usados por los astronautas en las lanzaderas espaciales de la NASA se sometieron a una prueba de 1.000 horas de duración en las instalaciones de la NASA en Huntsville, Alabama. Dos de los sistemas fallaron durante la prueba, uno después de 200 horas de funcionamiento y el otro después de 600 horas. Para calcular el porcentaje de fallos utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\text{FR}(\%) = \frac{\text{Número de fallos}}{\text{Número de unidades probadas}} = \frac{2}{20}(100\%) = 10\%$$

Ahora calculamos el número de fallos por hora de funcionamiento:

$$\text{FR}(N) = \frac{\text{Número de fallos}}{\text{Tiempo de funcionamiento}}$$

donde

$$\begin{aligned}
\text{Tiempo total} &= (1.000 \text{ h})(20 \text{ unidades}) \\
&= 20.000 \text{ unidades/hora} \\
\text{Tiempo no operativo} &= 800 \text{ horas para el primer fallo} + 400 \text{ horas para el segundo fallo} \\
&= 120 \text{ unidades/hora} \\
\text{Tiempo funcionamiento} &= \text{Tiempo total} \times \text{Tiempo no operativo} \\
\text{FR}(N) &= \frac{2}{20.000 - 1.200} = \frac{2}{18.800} \\
&= 0{,}000106 \text{ fallo/hora de funcionamiento}
\end{aligned}$$

y como $\text{MTBF} = \dfrac{1}{\text{FR}(N)}$

$$\text{MTBF} = \frac{1}{0{,}000106} = 9{,}434 \text{ horas de funcionamiento}$$

Si el típico viaje espacial de una lanzadera dura 60 días, la NASA estará interesada en el índice de fallos por viaje:

$$\begin{aligned}\text{Índice de fallos} &= (\text{fallos/hora de func.})(24 \text{ h/día})(60 \text{ días/viaje})\\ &= (0{,}000106)(24)(60)\\ &= 0{,}153 \text{ fallos/viaje}\end{aligned}$$

Puesto que la tasa de fallos obtenida en el Ejemplo 2 es probablemente demasiado alta, la NASA deberá o aumentar la fiabilidad de los componentes individuales, y por lo tanto del sistema, o instalar varias unidades de aire acondicionado de reserva (*backup*) en cada lanzadera espacial. Las unidades de reserva o seguridad proporcionan redundancia.

Cómo proporcionar redundancia

Para aumentar la fiabilidad de los sistemas, se añade **redundancia**. La técnica consiste en "respaldar" los componentes con componentes adicionales. Se conoce como la técnica de poner unidades en paralelo, y es una táctica de dirección de operaciones habitual, como se destaca en el recuadro sobre *Dirección de operaciones en acción* titulado "A los pilotos de los F-14 Tomcat les encanta la redundancia". Se proporciona redundancia para asegurar

Redundancia
Utilización de componentes en paralelo para aumentar la fiabilidad.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

A LOS PILOTOS DE LOS F-14 TOMCAT LES ENCANTA LA REDUNDANCIA

En un mundo que acepta software con fallos y computadoras que se quedan colgadas, merece la pena recordar que algunos sistemas informáticos funcionan sin ningún fallo. ¿Dónde están estos sistemas? Están en los aviones reactores de caza, en las naves espaciales, en las centrales nucleares y en los sistemas de control de inundaciones. Estos sistemas son extraordinariamente fiables, a pesar de que dependen en gran medida de su software. En estos sistemas se trata de tener redundancia (tienen su propio software y sus propios procesadores) y de utilizar la mayoría de su ciclos para realizar controles internos de calidad.

La geometría de ala variable del F-14 Tomcat le permite volar muy deprisa y frenar muy rápidamente cuando aterriza en un portaaviones. Los cálculos para determinar la posición correcta del ala a medida que cambia la velocidad del aire son realizados por software y procesadores dedicados. Los procesadores funcionan conjuntamente de forma que múltiples cálculos verifican las señales que se envían.

Sólo el 10 por ciento del software del F-14 sirve para hacer volar al avión; el 40 por ciento se utiliza para hacer pruebas y controles automáticos; el 50 por ciento restante es de redundancia. Los sistemas de alta fiabilidad funcionan porque su diseño incluye autocontroles y redundancia. Estos sistemas redundantes identifican problemas potenciales y los corrigen antes de que se produzca un fallo. Si es usted un piloto de un F-14 Tomcat, usted está enamorado de la redundancia.

Fuente: Information.com (1 de abril de 2002): 34.

que, si un componente falla, el sistema puede recurrir a otro. Por ejemplo, supongamos que la fiabilidad de un componente es 0,80 y la del componente de *backup* es 0,80. La fiabilidad resultante es la probabilidad de que el primer componente funcione más la probabilidad de que el componente de respaldo (o paralelo) funcione multiplicada por la probabilidad de necesitar el componente de apoyo (1 − 0,8 = 0,2). Por tanto:

$$\begin{pmatrix}\text{Probabilidad de}\\ \text{que el primer}\\ \text{componente}\\ \text{funcione}\end{pmatrix} + \left[\begin{pmatrix}\text{Probabilidad de}\\ \text{que el segundo}\\ \text{componente}\\ \text{funcione}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\text{Probabilidad de}\\ \text{necesitar el}\\ \text{segundo}\\ \text{componente}\end{pmatrix}\right] =$$

$$(0{,}8) \quad + \quad [(0{,}8 \quad \times \quad (1 - 0{,}8)] \quad = 0{,}8 + 0{,}16 = 0{,}96$$

El Ejemplo 3 muestra cómo la redundancia puede mejorar la fiabilidad del proceso de préstamos presentado en el Ejemplo 1.

EJEMPLO 3

Fiabilidad con un proceso paralelo

El Banco Nacional está preocupado porque su proceso de solicitud de préstamos sólo tienen una fiabilidad del 0,713 (*véase* el Ejemplo 1). Por ello, el banco decide proveer de redundancia a los dos empleados con menor fiabilidad. Los resultados del procedimiento se muestran a continuación:

R_1		R_2		R_3
0,90		0,8		
↓		↓		
0,90	→	0,8	→	0,99

$$= [0{,}9 + 0{,}9(1 - 0{,}9)] \times [0{,}8 + 0{,}8(1 - 0{,}8)] \times 0{,}99$$
$$= [0{,}9 + (0{,}9)(0{,}1)] \times [0{,}8 + (0{,}8)(0{,}2)] \times 0{,}99$$
$$= 0{,}99 \times 0{,}96 \times 0{,}99 = 0{,}94$$

Proveyendo redundancia a dos empleados, el Banco Nacional ha aumentado la fiabilidad del proceso de préstamos de 0,713 a 0,94.



El Ejemplo 3 se ilustra con más detalle en el ejercicio Active Model 17.2 del CD-ROM.

MANTENIMIENTO

Mantenimiento preventivo
Plan que implica realizar inspecciones y servicios rutinarios y mantener las instalaciones en buen estado para prevenir averías.

Existen dos tipos de mantenimiento, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo o de averías. El **mantenimiento preventivo** implica realizar inspecciones y servicios rutinarios y mantener las instalaciones en buen estado. Estas actividades están pensadas para desarrollar un sistema que encontrará fallos potenciales y efectuará cambios o reparaciones que evitarán los fallos. El mantenimiento preventivo es mucho más que mantener en funcionamiento la maquinaria y el equipo. También implica el diseño de sistemas técnicos y humanos que mantendrán funcionando el proceso productivo dentro de los límites de tolerancia, lo que permite que el sistema productivo rinda. El énfasis del mantenimiento preventivo está en entender el proceso y mantenerlo funcionando sin interrupcio-

nes. El **mantenimiento correctivo o por avería** se lleva a cabo cuando el equipo falla y se tiene que reparar en base a emergencia o prioridad.

Mantenimiento correctivo o por avería
Mantenimiento de recuperación que se lleva a cabo cuando un equipo falla y se tiene que reparar en base a emergencia o prioridad.

Implementación del mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo supone que podemos determinar cuándo un sistema necesita un servicio de mantenimiento o necesitará una reparación. Por lo tanto, para llevar a cabo el mantenimiento preventivo, necesitamos saber cuándo un sistema necesita servicio o cuándo es probable que falle. Los fallos se producen con diferentes tasas de ocurrencia durante la vida de un producto. Para muchos productos puede existir una elevada tasa de fallos inicial, conocida como **mortalidad infantil**[1]. Por este motivo, muchas empresas electrónicas "queman" sus productos antes de su distribución. Es decir, realizan diversas pruebas (tal como un ciclo de lavado completo en Maytag) para detectar los problemas de "puesta en marcha" antes de entregar los productos. Las empresas también pueden dar 90 días de garantía. Debemos remarcar que muchos de los fallos de mortalidad infantil no son fallos del producto *per se*, sino más bien fallos por uso inadecuado. Este hecho destaca la importancia en muchas industrias de que la dirección de operaciones sea capaz de crear un sistema de servicio postventa que incluya la instalación y la formación.

Mortalidad infantil
Tasa de fallos que se produce al comienzo de la vida de un producto o de un proceso.

Una vez que el producto, la máquina o el proceso está "instalado", se puede hacer un estudio de la distribución del tiempo medio entre fallos. Estas distribuciones suelen seguir una curva normal. Cuando estas distribuciones presentan pequeñas desviaciones estándar, entonces sabemos que tenemos un candidato al mantenimiento preventivo, aunque dicho mantenimiento sea caro[2].

Una vez que nuestra empresa ha detectado un candidato al mantenimiento preventivo, queremos determinar *cuándo* es económico dicho mantenimiento. Normalmente, cuanto más caro es el mantenimiento, más estrecha debe ser la distribución del tiempo medio entre fallos (es decir, debe tener una desviación estándar pequeña). Además, si no es más caro reparar el proceso cuando se avería que el coste del mantenimiento preventivo, quizá deberíamos dejar que el proceso falle y entonces proceder a la reparación. Sin embargo, hay que considerar bien las consecuencias del fallo. Incluso fallos relativamente menores pueden tener consecuencias catastróficas. En el otro extremo, los costes del mantenimiento preventivo pueden ser de tan poca importancia que el mantenimiento preventivo es adecuado incluso cuando la distribución MTBF es bastante plana (es decir, tiene una desviación estándar grande). En cualquier caso, para ser coherentes con las prácticas de enriquecimiento del trabajo, los operarios de las máquinas deben ser responsables del mantenimiento preventivo de sus equipos y herramientas.

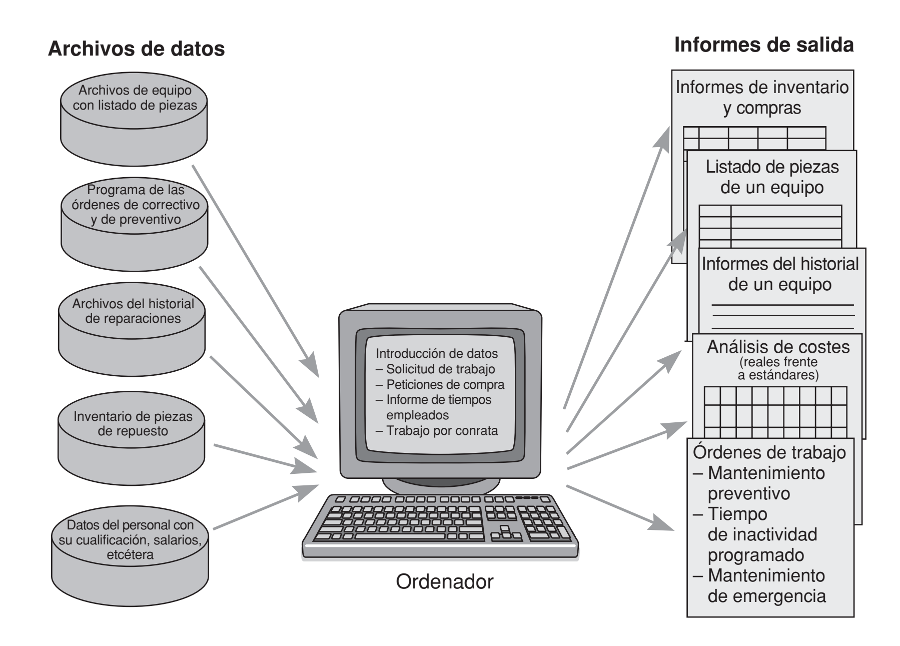
Con técnicas de información adecuadas, las empresas pueden mantener registros propios de procesos, máquinas o equipos. Estos registros pueden proporcionar el perfil del tipo de mantenimiento requerido por el activo y del cuándo hacer el mantenimiento necesario. El mantenimiento del historial del equipo es una parte muy importante de un sistema de mantenimiento preventivo, como lo es un registro del tiempo y del coste de realizar la reparación. Estos registros también pueden proporcionar información similar sobre familias de equipos y sobre proveedores.

El mantenimiento de registros es de tal importancia que la mayoría de los buenos sistemas de mantenimiento están ahora informatizados. La Figura 7.3 muestra los compo-

[1] Los fallos de mortalidad infantil suelen seguir una distribución exponencial negativa.

[2] *Véase*, por ejemplo, el trabajo de J. Michael Brock, John R. Michael y David Morganstein, "Using Statistical Thinking to Solve Maintenance Problems", *Quality Progress* (mayo de 1989): pp. 55-60.

FIGURA 7.3 ■ Sistema informatizado de mantenimiento



nentes principales de un sistema de este tipo, con los archivos a mantener a la izquierda, y los informes generados a la derecha.

La Figura 7.4(a) muestra el gráfico tradicional de la relación entre el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo. Según este enfoque, los directivos de operaciones buscan un *equilibrio* entre ambos costes. Asignando un mayor número de recursos al mantenimiento preventivo se reducirá el número de averías. Sin embargo, en algún momento, el descenso de los costes de mantenimiento por averías (correctivo) puede ser

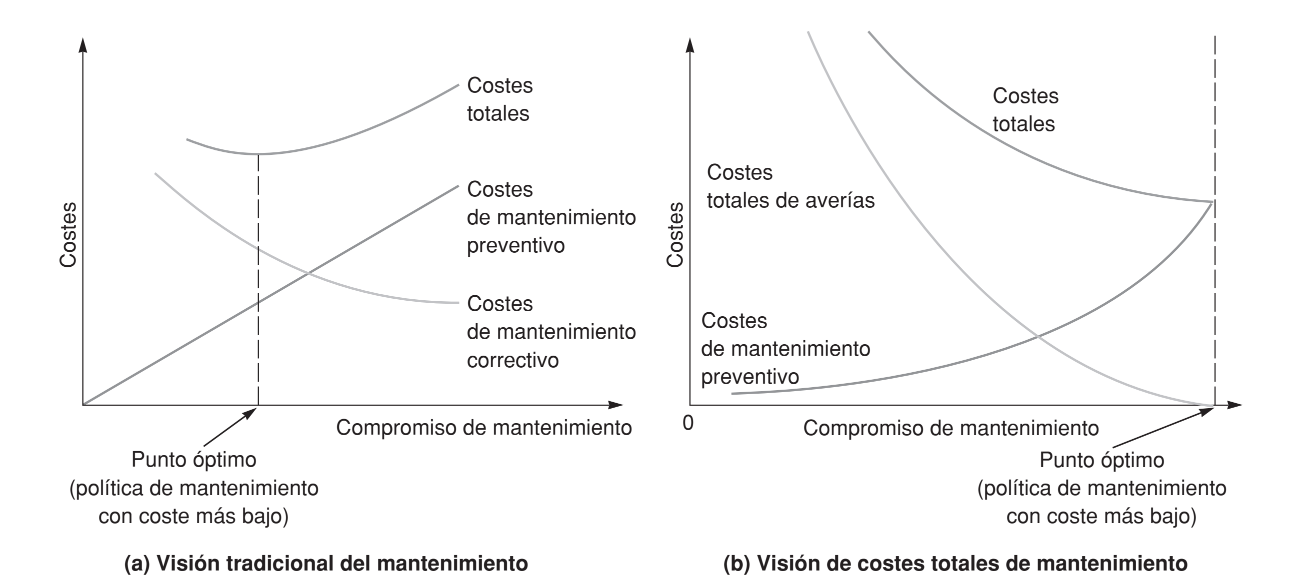


FIGURA 7.4 ■ Costes de mantenimiento

menor que el aumento de los costes de mantenimiento preventivo. En este punto, la curva de costes totales comenzará a ascender. Más allá de este punto óptimo, es mejor que la empresa espere a que se produzca una avería y que la repare cuando ocurra.

Desgraciadamente, las curvas de costes como las representadas en la Figura 7.4(a) rara vez consideran *los costes totales de una avería.* Muchos costes se ignoran por no estar *directamente* relacionados con la avería. Por ejemplo, normalmente no se considera el coste del inventario que se mantiene para compensar el tiempo inactivo. Además, el tiempo de inactividad puede tener un efecto devastador sobre la moral: los empleados pueden empezar a creer que no es importante alcanzar el estándar de rendimiento establecido, ni tampoco el mantenimiento del equipo. Por último, el tiempo de inactividad afecta negativamente a los programas de entrega, destruyendo las buenas relaciones con los clientes y las ventas futuras. Cuando se tiene en cuenta el impacto completo de las averías, la Figura 7.4(b) puede ser una mejor representación de los costes de mantenimiento. En la Figura 7.4(b), los costes totales alcanzan el mínimo cuando el sistema no se avería.

Suponiendo que se han identificado todos los costes potenciales asociados al tiempo de inactividad, el personal de operaciones puede calcular teóricamente el nivel óptimo de la actividad de mantenimiento. Este análisis, evidentemente, también requiere datos históricos exactos de los costes de mantenimiento, de las probabilidades de avería y de los tiempos de reparación. El Ejemplo 4 muestra la manera de comparar los costes del mantenimiento preventivo y del mantenimiento correctivo para poder elegir la política de mantenimiento menos cara.

EJEMPLO 4

Comparación de los costes de mantenimiento preventivo y correctivo

Farlen & Halikman es una empresa de asesoría fiscal que está especializada en preparar nóminas. La empresa ha automatizado con éxito la mayor parte de su trabajo, utilizando impresoras de alta velocidad para procesar los cheques y para preparar informes. Sin embargo, el enfoque de informatización adoptado por la firma tiene problemas. Durante los 20 últimos meses las impresoras se averiaron con la tasa indicada en la siguiente tabla:

Número de averías	Número de meses en que se produjo ese número de averías
0	2
1	8
2	6
3	4
	Total: 20

Cada vez que las impresoras se averían, Farlen & Halikman estima que pierde una media de 300 dólares por tiempo y gastos de asistencia técnica. Una alternativa es contratar un servicio de mantenimiento preventivo. Aunque Farlen & Halikman contrate un mantenimiento preventivo, aún se producirán averías, a una *media* de una avería al mes. El precio de este servicio es de 150 dólares al mes. Para decidir si Farlen & Halikman debe contratar el mantenimiento preventivo, vamos a seguir los cuatro siguientes pasos.

Paso 1: Calcular el número esperado de averías (a partir del historial) si la empresa continúa como hasta ahora, sin el contrato del servicio de mantenimiento.

Paso 2: Calcular el coste esperado de averías al mes, sin contratar el mantenimiento preventivo.

Paso 3: Calcular el coste del mantenimiento preventivo.
Paso 4: Comparar las dos opciones y seleccionar la que tenga un coste menor.

1.

Número de averías	Frecuencia	Número de averías	Frecuencia
0	2/20 = 0,1	2	6/20 = 0,3
1	8/20 = 0,4	3	4/20 = 0,2

$$\begin{pmatrix}\text{Número esperado}\\ \text{de fallos}\end{pmatrix} = \sum \left[\begin{pmatrix}\text{Número}\\ \text{de fallos}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\text{Frecuencia}\\ \text{correspondiente}\end{pmatrix}\right] =$$

$$= (0)(0{,}1) + ((1)(0{,}4) + (2)(0{,}3) + (3)(0{,}2)$$

$$= 0 + 0{,}4 + 0{,}6 + 0{,}6$$

$$= 1{,}6 \text{ fallos/mes}$$

2. Coste esperado de averías $= \begin{pmatrix}\text{Número esperado}\\ \text{de averías}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\text{Coste}\\ \text{por avería}\end{pmatrix}$

$$= (1{,}6)(300\$)$$

$$= 480 \text{ dólares/mes}$$

3. $\begin{pmatrix}\text{Coste de mante-}\\ \text{nimiento preventivo}\end{pmatrix} = \left[\begin{pmatrix}\text{Coste esperado}\\ \text{de averías si se}\\ \text{contrata el servicio}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\text{Coste del contrato}\\ \text{del servicio}\end{pmatrix}\right]$

$$= (1 \text{ avería/mes})(300\$) + 150 \text{ dólares/mes}$$

$$= 450 \text{ dólares/mes}$$

4. Como es menos caro globalmente contratar una empresa de servicio de mantenimiento (450 dólares), que no hacerlo (480 dólares), Parlen & Halikman debería contratar la empresa de servicios.

Mediante variaciones de la técnica empleada en el Ejemplo 4, los directivos de operaciones pueden examinar políticas de mantenimiento.

Incremento de las capacidades de reparación

Debido a que la fiabilidad y el mantenimiento preventivo casi nunca son perfectos, la mayoría de las empresas optan por tener un determinado nivel de capacidad de reparación. Ampliando o mejorando las instalaciones de reparación se puede conseguir que el sistema de producción vuelva a estar operativo rápidamente. Una buena instalación de mantenimiento debe tener las seis siguientes características:

1. Personal bien formado.
2. Recursos adecuados.
3. Capacidad para establecer un plan y unas prioridades de reparación[3].

---

[3] Usted puede recordar, de la exposición sobre planificación de redes del Capítulo 3 del volumen *Decisiones Estratégicas,* que DuPont desarrolló el método del camino crítico (CPM) para mejorar la programación de sus proyectos de mantenimiento.

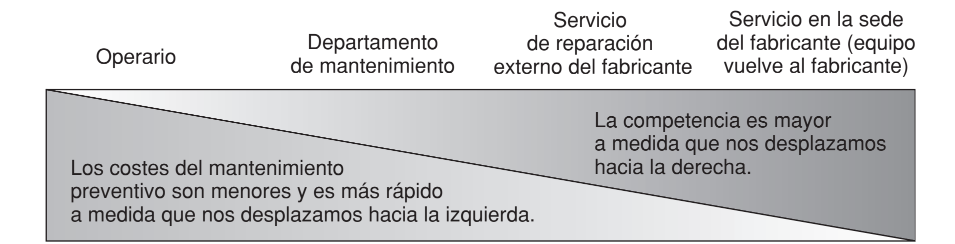


FIGURA 7.5 ■ El director de operaciones debe determinar cómo se realizará el mantenimiento

4. Capacidad y autoridad para planificar los materiales.
5. Capacidad para identificar la causa de los fallos.
6. Capacidad para diseñar formas de aumentar el MTBF.

Sin embargo, no todas las reparaciones se pueden llevar a cabo en las instalaciones de la empresa. Los directores deben decidir, por tanto, dónde se van a realizar las reparaciones. La Figura 7.5 muestra algunas de las opciones y cómo se evalúan en función de rapidez, costes y competencia. En coherencia con las ventajas de la potenciación de los empleados, un argumento poderoso puede ser el que sean ellos quienes se encarguen del mantenimiento de su propio equipo. Sin embargo, este enfoque podría constituir el punto débil en la cadena de reparación, ya que no se puede formar a cada empleado en todos los aspectos de la reparación del equipo. En la Figura 7.5, a medida que nos desplazamos hacia la derecha, la competencia en el trabajo de reparación mejora, pero también se produce un incremento en los costes, ya que ello puede conllevar una cara reparación en el exterior con los correspondientes incrementos en el tiempo necesario para tener de nuevo disponible el activo y en el transporte.

Sin embargo, las políticas y las técnicas de mantenimiento preventivo deben hacer hincapié en que los empleados acepten la responsabilidad del mantenimiento que ellos son capaces de realizar. Puede que el mantenimiento que hacen los empleados sólo sea del tipo “limpiar, controlar y observar”, pero si cada empleado realiza estas actividades dentro de su capacidad, el director habrá subido un peldaño en el proceso de potenciación de los empleados y en el de mantener el rendimiento del sistema.

MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL

Muchas empresas han trasladado conceptos de la dirección de calidad total a la práctica del mantenimiento preventivo con un enfoque conocido como **mantenimiento productivo total (MPT)**. Conlleva la reducción de la variabilidad a través de la implicación de los empleados y de excelentes registros de mantenimiento. Además, el mantenimiento productivo total incluye:

Mantenimiento productivo total (MPT)
Combina la gestión de calidad total con un enfoque estratégico del mantenimiento, desde el diseño de procesos y equipos hasta el mantenimiento preventivo.

- Diseñar máquinas fiables, fáciles de manejar y de fácil mantenimiento.
- Hacer hincapié en el coste total de propiedad cuando se compren las máquinas, de forma que el servicio y el mantenimiento estén incluidos en el coste.
- Desarrollar planes de mantenimiento preventivo, que utilicen las mejores prácticas de los operarios, de los departamentos de mantenimiento y del servicio del fabricante.
- Formar a los trabajadores para que manejen y mantengan sus propias máquinas.

Una alta utilización de las instalaciones, una programación rigurosa, un inventario reducido y una calidad constante requieren fiabilidad[4]. El mantenimiento productivo total es la clave para reducir la variabilidad y aumentar la fiabilidad.

TÉCNICAS PARA DEFINIR POLÍTICAS DE MANTENIMIENTO

Otras dos técnicas de dirección de operaciones han probado ser beneficiosas para conseguir un mantenimiento eficaz: la simulación y los sistemas expertos.

Simulación Debido a la complejidad de algunas decisiones de mantenimiento, la simulación por computadora es una herramienta adecuada para evaluar el impacto de diferentes políticas. Por ejemplo, el personal de operaciones puede decidir si necesita más personal determinando los equilibrios (*trade-off*) entre los costes del tiempo de inactividad de la maquinaria y los costes de la mano de obra adicional[5]. La dirección también puede simular la sustitución de piezas que aún no han fallado como una forma de prevenir futuras averías. También puede ser útil la simulación vía modelos físicos. Por ejemplo, un modelo físico puede hacer vibrar un avión para simular miles de horas de tiempo de vuelo para evaluar las necesidades de mantenimiento.

Sistemas expertos Los directores de operaciones utilizan sistemas expertos (es decir, programas informáticos que imitan la lógica humana) para ayudar al personal de mantenimiento a aislar y a reparar diferentes fallos en la maquinaria y equipos. Por ejemplo, el sistema DELTA de General Electric formula una serie de detalladas preguntas que ayudan al usuario a identificar un problema. DuPont utiliza sistemas expertos para controlar los equipos y para formar al personal de reparaciones.

RESUMEN

Los directores de operaciones se centran en diseñar mejoras en los componentes y en disponer de componentes de respaldo (*backup*) para mejorar la fiabilidad. Las mejoras en la fiabilidad también se pueden conseguir utilizando mantenimiento preventivo y excelentes instalaciones de reparaciones.

Algunas empresas utilizan sensores automáticos y otro tipo de controles para avisar cuando la maquinaria de producción está a punto de fallar o está dañándose por calor, vibraciones, o escapes de fluidos. El objetivo de estos procedimientos no es sólo evitar los fallos, sino también llevar a cabo un mantenimiento preventivo antes de que las máquinas se averíen.

Por último, muchas empresas inculcan a sus empleados el sentido de "propiedad" de sus equipos. Cuando los trabajadores reparan o realizan el mantenimiento preventivo de sus propias máquinas, se reducen las averías. Los empleados bien formados y a los que se les han delegado competencias aseguran sistemas fiables mediante el mantenimiento preventivo. A su vez, un equipo fiable y bien mantenido no sólo proporciona una alta utilización, sino que también mejora la calidad y el cumplimiento de los programas. Las mejores empresas construyen y mantienen sistemas para que los clientes puedan disponer de los productos y servicios que se han producido según las especificaciones y puntualmente.

---

[4] Esta conclusión está respaldada por una serie de estudios; *véase*, por ejemplo, Kathleen E. McKone, Roger G. Schroeder y Kristy O. Cua, "The Impact of Total Productive Maintenance Practices on Manufacturing Performance", *Journal of Operations Management* 19, n.º 1 (enero de 2001): pp. 39-58.

[5] Christian Striffler, Walton Hancock y Ron Turkett, "Maintenance Staffs: Size Them Right", *IIE Solutions* 32, n.º 12 (diciembre de 2000): pp. 33-38.



Mantenimiento *(p. 285)*
Fiabilidad *(p. 285)*
Tiempo medio entre fallos (MTBF) *(p. 288)*
Redundancia *(p. 289)*
Mantenimiento preventivo *(p. 290)*
Mantenimiento correctivo o por avería *(p. 291)*
Mortalidad infantil *(p. 291)*
Mantenimiento productivo total (MPT) *(p. 295)*

CÓMO UTILIZAR EL SOFTWARE PARA RESOLVER LOS PROBLEMAS DE FIABILIDAD

Se pueden utilizar los programas Excel y POM para Windows para resolver problemas de fiabilidad. Excel OM no dispone de un módulo para abordar estas cuestiones.



Cómo utilizar POM para Windows

El módulo de fiabilidad de POM para Windows permite introducir (1) un determinado número de sistemas (componentes) en las series (de 1 a 10); (2) un determinado número de componentes de respaldo o paralelo (de 1 a 12); y (3) los datos de la fiabilidad de los componentes para los en serie y los en paralelo. *Véase* el Apéndice IV para más detalles.



PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto 7.1

El semiconductor que se utiliza en la Sullivan Wrist Calculator (Calculadora de muñeca Sullivan) tiene 5 partes, y cada una de ellas tiene su propio índice de fiabilidad. El componente 1 tiene una fiabilidad del 0,90; el componente 2, del 0,95; el componente 3, del 0,98; el componente 4, del 0,90, y el componente 5, del 0,99. ¿Cuál es la fiabilidad de un semiconductor?

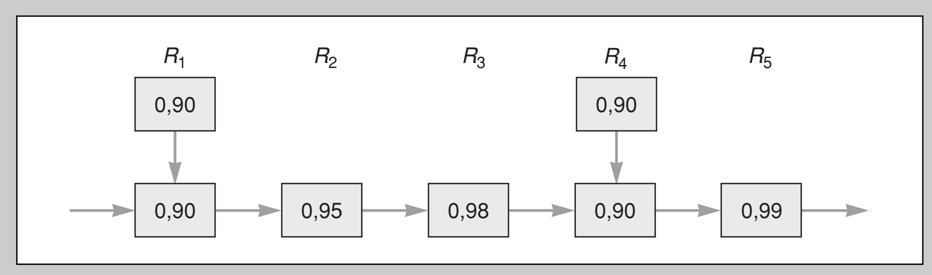
Solución

Fiabilidad del semiconductor:

$$\begin{aligned} R_s &= R_1 \times R_2 \times R_3 \times R_4 \times R_5 \\ &= (0{,}90)(0{,}95)(0{,}98)(0{,}90)(0{,}99) \\ &= 0{,}7466 \end{aligned}$$

Problema Resuelto 7.2

Un reciente cambio de ingeniería en la Sullivan Wrist Calculator coloca un componente de respaldo (*backup*) en cada uno de los dos transistores de menor fiabilidad del circuito. El nuevo circuito queda de la siguiente forma:



¿Cuál es la fiabilidad del nuevo sistema?

Solución

$$\begin{aligned}\text{Fiabilidad} &= [0{,}9 + (1 - 0{,}9) \times 0{,}9] \times 0{,}95 \times 0{,}98 \times [0{,}9 + (1 - 0{,}9) \times 0{,}9] \times 0{,}99\\ &= [0{,}9 + 0{,}09] \times 0{,}95 \times 0{,}98 \times [0{,}9 + 0{,}09] \times 0{,}99\\ &= 0{,}99 \times 0{,}95 \times 0{,}98 \times 0{,}99 \times 0{,}99\\ &= 0{,}903\end{aligned}$$

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.

 En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Visita virtual a una empresa
- Problemas en Internet
- Caso de estudio en Internet


En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Ejercicio Active Model
- POM para Windows

CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. ¿Cuál es el objetivo del mantenimiento y de la fiabilidad?
2. ¿Cómo se identifica a un candidato para mantenimiento preventivo?
3. Explique el concepto de "mortalidad infantil" en el contexto de la fiabilidad del producto.
4. ¿Por qué es a menudo la simulación una técnica adecuada para los problemas de mantenimiento?
5. ¿Dónde está el equilibrio (*trade-off*) entre el mantenimiento realizado por el operario y el mantenimiento realizado por el proveedor?
6. ¿Cómo puede un directivo evaluar la eficacia de la función de mantenimiento?
7. ¿Cómo contribuye el diseño de una máquina a aumentar o paliar un problema de mantenimiento?
8. ¿Qué papeles puede desempeñar la tecnología de la información en la función de mantenimiento?
9. Durante una discusión sobre las ventajas del mantenimiento preventivo en Windsor Printers, el propietario de la empresa preguntó: "¿Para qué vamos a arreglarlo antes de que se estropee?" ¿Qué contestaría usted como director de mantenimiento?
10. ¿Puede el mantenimiento preventivo eliminar *todas* las averías?



DILEMA ÉTICO

Cuando un DC-10 de McDonnell Douglas se estrelló en Iowa, la investigación posterior indicó que los sistemas hidráulicos no proporcionaban suficiente protección. El DC-10 tiene tres sistemas hidráulicos independientes que fallaron, los tres, cuando explotó un motor. El motor desprendió trozos de metal que cortaron las tuberías de dos de

los sistemas, mientras el tercero necesitaba energía del tercer motor que ya no existía. A diferencia de otros aviones comerciales, el DC-10 no tenía válvulas de cierre que pudieran parar el flujo de fluido hidráulico. El trirreactor similar L-1011 de Lockheed tiene cuatro sistemas hidráulicos. Un vicepresidente de McDonnell Douglas dijo en aquella ocasión: "Siempre se puede ser extremista y no llegar nunca a tener un avión que se pueda utilizar. Se puede tener una seguridad perfecta y nunca despegar". Evalúe los pros y los contras de la postura de McDonnell. ¿Cómo diseñaría usted un experimento de fiabilidad? ¿Qué ha ocurrido a McDonnell Douglas Corporation desde entonces?



PROBLEMAS*

• **7.1.** La unidad central de proceso de la computadora Beta II contiene 50 componentes en serie. La fiabilidad media de cada componente es del 99 por ciento. Utilizando la Figura 7.2, calcule la fiabilidad total de la unidad de proceso.

• **7.2.** Un proceso de prueba de un avión Boeing tiene 400 componentes en serie. La fiabilidad media de cada componente es del 95,5 por ciento. Utilizando la Figura 7.2, ¿cuál es la fiabilidad total del proceso de prueba?

•**P** **7.3.** ¿Cuál es el número *esperado* de averías al año para el generador de electricidad de Orlando, que ha mostrado los siguientes datos en los últimos 20 años?

Número de averías	0	1	2	3	4	5	6
Número de años en los que ha ocurrido este número de averías	2	2	5	4	5	2	0

•**P** **7.4.** Cada avería en un trazador (*plotter*) de gráficos en Airbus Industries cuesta 50 dólares. Calcule el coste esperado de averías por día, a partir de los siguientes datos:

Número de averías	0	1	2	3	4
Probabilidad de averías diaria	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1

:**P** **7.5.** Se está diseñando un nuevo sistema de control de un avión que debe tener una fiabilidad del 98 por ciento. Este sistema tiene tres componentes en serie. Si los tres componentes deben tener el mismo grado de fiabilidad, ¿qué fiabilidad se necesita?

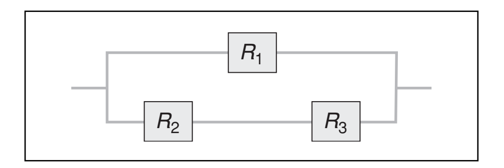
: **7.6.** Robert Klassan Manufacturing, un fabricante de equipamiento médico, ha sometido a 100 marcapasos a 5.000 horas de prueba. A mitad de la prueba, 5 marcapasos fallaron. ¿Indique el índice de fiabilidad expresado en:

a) Porcentaje de fallos.
b) Número de fallos por hora.
c) Número de fallos por año.
d) Si estos marcapasos se colocan a 1.100 personas, ¿cuántas unidades podemos esperar que fallen durante el primer año.

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows.

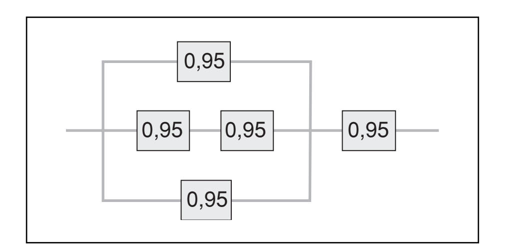
P **7.7.** ¿Cuál es la fiabilidad del siguiente proceso de producción?

$$R_1 = 0{,}95,\ R_2 = 0{,}90,\ R_3 = 0{,}98$$



P **7.8.** Tiene un sistema compuesto por cuatro componentes en serie. La fiabilidad de cada componente es del 0,95 por ciento. ¿Cuál es la fiabilidad del sistema?

P **7.9.** ¿Cuál es la fiabilidad de que los préstamos de un banco se procesen correctamente si cada uno de los 5 empleados que se muestran en el gráfico tiene la fiabilidad mostrada?

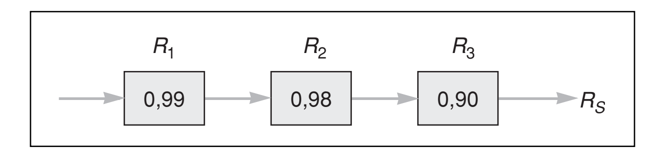


P **7.10.** Merrill Kim Sharp tiene un sistema compuesto por tres componentes en paralelo. Los componentes tienen las siguientes fiabilidades:

$$R_1 = 0{,}90, \qquad R_2 = 0{,}95, \qquad R_3 = 0{,}85$$

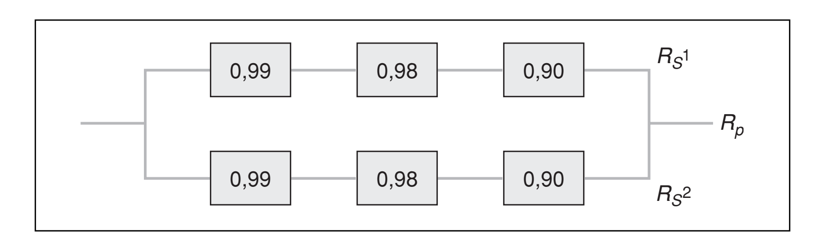
¿Cuál es la fiabilidad del sistema? (Sugerencia: *véase* el Ejemplo 3).

P **7.11.** Un sistema de control médico tiene tres componentes en serie con las fiabilidades individuales (R_1, R_2, R_3) que se muestran:



¿Cuál es la fiabilidad del sistema?

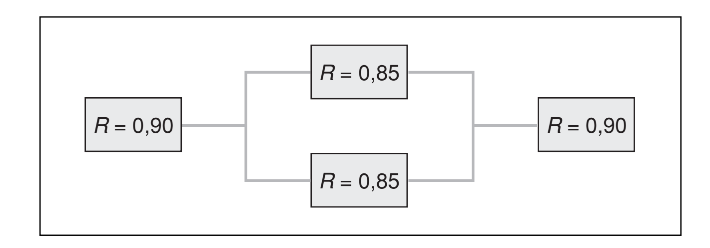
P **7.12**. **a)** ¿Cuál es la fiabilidad del sistema que se muestra a continuación?



b) ¿En cuánto mejoraría la fiabilidad del sistema de control médico del problema anterior si se cambiara al sistema paralelo redundante mostrado aquí?

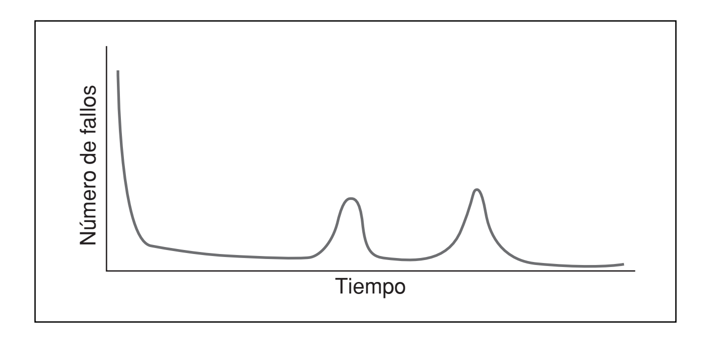
:P **7.13.** Suponga que en la cirugía de bypass cardiaco, el 85 por ciento de los pacientes sobrevive a la operación, el 95 por ciento sobrevive al periodo de recuperación tras la intervención, el 80 por ciento consigue hacer los cambios de estilo de vida necesarios para ampliar su supervivencia a un año o más, y sólo el 10 por ciento de los que no hacen los cambios de estilo de vida sobreviven más de un año. ¿Cuál es la probabilidad de que un paciente cualquiera sobreviva más de un año?

:P **7.14**. El equipo de diseño de Elizabeth Irwin ha propuesto el siguiente sistema, con las fiabilidades de los componentes que se indican a continuación:



¿Cuál es la fiabilidad del sistema?

: **7.15.** El departamento de mantenimiento de Mechanical Dynamics le presenta la siguiente curva de fallos. ¿Qué sugiere?



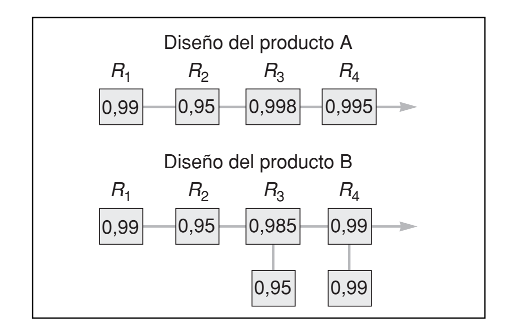
:P **7.16.** Rick Wing, vendedor de Wave Soldering Systems, Inc. (WSSI), le ha pasado una propuesta para mejorar el control de temperatura de su máquina. La máquina utiliza una cuchilla de aire caliente para eliminar limpiamente el exceso de soldadura de las placas base; es una gran idea, pero el control de la temperatura del aire caliente carece de fiabilidad. Según Wing, los ingenieros de WSSI han mejorado la fiabilidad de los controles de la temperatura. El nuevo sistema aún conserva los cuatro sensibles circuitos integrados para controlar la temperatura, pero la nueva máquina tiene un circuito de respaldo (*backup*) para cada uno. Los cuatro circuitos integrados tienen las siguientes fiabilidades: 0,90, 0,92, 0,94 y 0,96. Todos los circuitos de apoyo tienen una fiabilidad de 0,90.

a) ¿Cuál es la fiabilidad del nuevo controlador de la temperatura?
b) Si usted paga una prima, Wings dice que puede mejorar las cuatro unidades de *backup* hasta 0,93. ¿Cuál es la fiabilidad de esta opción?

7.17. ¿Cuál es el número esperado de averías por año para una máquina de la que se tienen los siguientes datos?

Número de averías	0	1	2	3	4	5
Número de años en que se produjeron las averías	4	3	1	5	5	0

P 7.18. Como Vicepresidente de operaciones de Brian Normoyle Engineering, tiene que decidir qué diseño de producto, el A o el B, tiene más fiabilidad. B está diseñado con unidades de respaldo para los componentes R3 y R4. ¿Cuál es la fiabilidad de cada diseño?



7.19. Una transacción típica en un comercio detallista está compuesta de varias partes, que se pueden considerar componentes susceptibles de fallo. Una relación de estos componentes podría ser:

Componente	Descripción	Definición del fallo
1	Encontrar el producto con el tamaño, color, etc., adecuado	No se puede encontrar el producto
2	Colocarse en la cola de una caja	No hay cajas abiertas; hay colas demasiado largas; la cola tiene problemas
3	Escanear el código de barras del producto para ver nombre, precio, etc.	No se puede escanear; el artículo no está en los archivos; se escanea incorrectamente el nombre o el precio
4	Cálculo del total de la compra	Peso equivocado; entrada de datos incorrecta; impuestos incorrectos
5	Efectuar el pago	El cliente no tiene efectivo; el cheque no es aceptable; tarjeta de crédito rechazada
6	Dar el cambio	Se da un cambio incorrecto
7	Meter la mercancía en una bolsa	Se daña la mercancía al meterla en la bolsa; se rompe la bolsa
8	Concluir la transacción y salir	No se entrega el recibo; vendedor distante, antipático, maleducado

Suponga que las ocho probabilidades de éxito son 0,92, 0,94, 0,99, 0,99, 0,98, 0,97, 0,95 y 0,96. ¿Cuál es la fiabilidad del sistema, es decir, la probabilidad de que el cliente se vaya satisfecho? Si fuera usted el director de la tienda, ¿cuál cree que debería ser un valor aceptable para esta probabilidad? ¿Qué componentes serán buenos candidatos para tener un respaldo, y cuáles para rediseñar?



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: 7.20 a 7.24.

Caso de estudio

Worldwide Chemical Company

Jack Smith se secó el sudor de la cara. Era otro de esos días de verano infernalmente caluroso, y una de las cuatro unidades de refrigeración estaba estropeada. Las unidades eran esenciales para el funcionamiento de la planta de fibras de Worldwide Chemical Company, que produce fibras sintéticas y copos de polímeros para un mercado global.

Poco después, Al Henson, encargado del turno de día, estaba gritando por el interfono su familiar proclama, "rodarán cabezas" si la unidad no entra en funcionamiento dentro de una hora. Sin embargo, Jack Smith, el encargado de mantenimiento, había escuchado siempre lo mismo, pero nunca pasaba nada después de las pataletas de Henson. "Le está bien merecido –pensó–. Henson nunca está dispuesto a cooperar cuando queremos realizar mantenimiento planificado; por lo tanto, no se consigue hacer nunca y el equipo se avería".

Sin embargo, en aquel momento, Henson estaba verdaderamente furioso por el impacto que la avería podría tener en las cifras de rendimiento de su proceso. Reunido con la directora de la planta, Beth Conner, acusó a todo el departamento de mantenimiento de haber estado sin hacer nada y jugando a las cartas, como si fueran bomberos que esperasen el sonido de una alarma para ir con sus tres centelleantes luces por toda la ciudad. Este enfoque de mantenimiento "de arreglarlo cuando se estropea", le estaba costando a la planta producción que era vital para cumplir con los costes estándares y para evitar importantes desacuerdos. Los competidores extranjeros estaban entregando fibras de alta calidad en menos tiempo y a precios más bajos. Conner ya había sido llamado a capítulo en la sede central de la empresa porque los niveles de producción estaban significativamente por debajo de lo presupuestado. El ciclo del negocio contiene variaciones estacionales predecibles. Esto significa crear inventarios que deben ser mantenidos durante meses, inmovilizando un capital que es escaso, una característica de la mayoría de los procesos continuos. Los envíos mensuales no parecían ir bien. Los envíos anuales hasta la fecha aún iban peor, debido a las averías de las máquinas y a la pérdida de producción. Conner sabía que tenía que hacer algo para conseguir fiabilidad en la maquinaria. Era necesario ser capaz de responder a la demanda para poder hacer frente a la creciente competencia extranjera. Un equipo de producción poco fiable estaba poniendo en peligro el esfuerzo de gestión de calidad total de la empresa, provocando variaciones en el proceso, que afectaban tanto a las producciones de productos de primera de calidad como al cumplimiento de los plazos de entrega. Pero parecía que nadie tenía la respuesta para el problema de las averías de las máquinas.

El departamento de mantenimiento funcionaba como si fuera el cuerpo de bomberos, corriendo hacia una avería con una multitud de mecánicos. Algunos desmontaban la máquina, mientras que otros estudiaban minuciosamente los planos de la instalación eléctrica, y otros buscaban piezas de repuesto en el almacén de mantenimiento. Al final, conseguían arreglar la máquina, aunque algunas veces sólo tras trabajar toda la noche para conseguir que la línea de producción funcionase de nuevo. El mantenimiento siempre se ha hecho de esta manera. Sin embargo, con los nuevos competidores, la fiabilidad de la maquinaria se ha convertido repentinamente en la principal barrera para poder competir con éxito.

Están empezando a circular rumores de que la planta va a cerrar, lo que está afectando a la moral, haciendo más difícil conseguir un buen rendimiento de la misma. Beth Conner sabía que necesitaba soluciones para que la planta tuviera alguna posibilidad de supervivencia.

Preguntas para el debate

1. ¿Pueden Smith y Henson hacer algo para mejorar el rendimiento?
2. ¿Existe alguna alternativa para el actual enfoque de operaciones del departamento de mantenimiento?
3. ¿Cómo podría producción recuperar la pérdida de output que resultase de un mantenimiento planificado?
4. ¿Cómo se podrían utilizar mejor los mecanismos de mantenimiento?
5. ¿Existe algún modo de averiguar cuándo es probable que se averíe una máquina?

Fuente: Patrick Owings bajo la supervisión de la profesora Marilyn M. Helms, de la Universidad de Tennesse en Chattanooga.

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Visite nuestra página personal www.prenhall.com/heizer para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Cartak's Department Store (Los grandes almacenes Cartak):** Exige la evaluación del impacto de un verificador de facturas adicional.

Harvard ha seleccionado estos casos de la Harvard Business School para acompañar este capítulo (textbookcasematch.hbsp.harvard.edu):

- **The Dana-Farber Cancer Institute.** (#699-025): Analiza las características organizativas y de proceso que podrían haber contribuido a que se produjera un error médico.
- **Workplace Safety at Alcoa (A) [Seguridad laboral en Alcoa (A)]** (#692-042): Estudia el reto que afronta un directivo de una importante fábrica de aluminio en su esfuerzo por mejorar la seguridad.
- **A Brush with AIDS (A) [Un cepillo con SIDA (A)]** (#394-058): Dilema ético cuando las agujas atraviesan la pared del envase.

BIBLIOGRAFÍA

Ahire, Sanjay, Garrison Greenwood, Ajay Gupta, y Mark Terwilliger. "Workforce-Constrained Preventive Maintenance Scheduling Using Evolution Strategies". *Decision Sciences* 31, n.º 4 (otoño 2000): pp. 833-859.

Ambs, Ken, *et al.* "Optimizing Restoration Capacity in the AT&T Network". *Interfaces* 30, n.º 1 (enero-febrero 2000): pp. 26-44.

Blank, Ronald. *The Basics of Reliability*. University Park, IL: Productivity Press, 2004.

Condra, Lloyd W. *Reliability Improvement with Design of Experiments*, 2.ª ed. New York: Marcel Dekker, 2001.

Cua, Kristy O., Kathleen E. McKone, y Roger G. Schroeder. "Relationships between Implementation of TQM, JIT, and TPM and Manufacturing Performance". *Journal of Operations Management* 19, n.º 6 (noviembre 2001): pp. 675-694.

Keizers, Joris M., J. Will M. Bertrand, y Jaap Wessels. "Diagnosing Order Planning Performance at a Navy Maintenance and Repair Organization, Using Logistic Regression". *Production and Operations Management* 12, n.º 4 (invierno 2003): pp. 445-463.

Ravinder, H. V. y Carl R. Schultz. "Decision Making in a Standby Service System". *Decision Sciences* 31, n.º 3 (verano 2000): pp. 573-593.

Sova, Roger, y Lea A. P. Tonkin. "Total Productive Maintenance at Crown International". *Target: Innovation at Work* 19, n.º 1 (tercer trimestre 2003): pp. 41-44.

Westerkamp, Thomas A. "Plan for Maintenance Productivity". *IIE Solutions* 33, n.º 8 (agosto 2001): pp. 36-41.



RECURSOS EN INTERNET

Reliability Engineering:
http://www.enre.umd.edu/
Center for System Reliability
http://reliability.sandia.gov
Reliability Analysis Center
http://rac.alionscience.com
Society for Maintenance and Reliability Professionals:
http://www.smrp.org/
Society of Reliability Engineers:
http://www.sre.org/

MÓDULO CUANTITATIVO A

HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES

CONTENIDO DEL MÓDULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando acabe este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Árboles de decisión y tablas de decisión
- Mayor valor monetario
- Valor esperado de la información perfecta
- Decisiones secuenciales

Describir o explicar:

- Toma de decisiones bajo riesgo
- Toma de decisiones bajo incertidumbre
- Toma de decisiones bajo certeza

"El ejecutivo de empresa es, por su profesión, alguien que tiene que tomar decisiones. Su enemigo es la indecisión. Su misión es superarla".
John McDonald

Los directores de operaciones deben tomar decisiones. Para lograr los objetivos de sus organizaciones, deben comprender cómo se toman las decisiones y conocer qué herramientas se deben utilizar. En gran medida, el éxito o fracaso de las personas y empresas depende de la calidad de sus decisiones. Bill Gates, que desarrolló los sistemas operativos DOS y Windows, se convirtió en el presidente de la compañía de software más importante del mundo (Microsoft) y en multimillonario. Por el contrario, el director de Firestone que dirigió el equipo que diseñó los neumáticos defectuosos, que a finales de la década de 1990 provocaron tantos accidentes en el modelo Ford Explorer, ya no trabaja allí.

La decisión que tenía que tomar el responsable de pozos exploratorios era dura: ¿Cuál de las dos nuevas regiones de Kentucky arrendadas, Blair East o Blair West, tendría que perforar en busca de petróleo? Una decisión equivocada en este tipo de perforación exploratoria petrolífera puede significar la diferencia entre el éxito o la quiebra de la empresa. ¡Esto sí que es tomar decisiones bajo presión e incertidumbre! Pero, utilizando un árbol de decisión, el Presidente Thomas e. Blair de Tomco Oil identificó 74 opciones diferentes, cada una con su propio beneficio neto potencial. Lo que había empezado como una ingente cantidad de factores geológicos, de ingeniería, económicos y políticos estaba ahora mucho más claro. Blir comentó: "El análisis con árboles de decisión nos ofreció una manera sistemática de planificar estas decisiones y de tener una idea más clara de los numerosos y diversos resultados financieros que eran posibles."[1]

EL PROCESO DE TOMA DE DECISIONES EN OPERACIONES

¿Qué es lo que diferencia una buena de una mala decisión? Una "buena" decisión (la que utiliza una toma de decisión analítica) se basa en la lógica y considera todos los datos disponibles y todas las alternativas posibles. También sigue los seis siguientes pasos:

1. Define con claridad el problema y los factores que influyen en él.
2. Desarrolla objetivos específicos y mensurables.
3. Desarrolla un modelo, es decir, una relación entre los objetivos y las variables (que son cantidades mensurables).
4. Evalúa cada solución alternativa en función de sus ventajas e inconvenientes.
5. Selecciona la mejor alternativa.
6. Implementa la decisión, estableciendo un calendario para su finalización.

A lo largo de este libro se ha presentado un amplio abanico de modelos y herramientas matemáticas para ayudar a los directores de operaciones a tomar mejores decisiones. La eficacia de las operaciones depende de una toma de decisiones cuidadosa. Afortunadamente, existe una completa variedad de herramientas analíticas que ayudan a esta toma de decisiones. Este módulo introduce dos de ellas: las tablas de decisión y los árboles de decisión. Se utilizan en un gran número de situaciones de dirección de operaciones, que van desde el análisis de nuevos productos (Capítulo 5 del volumen *Decisiones Estratégicas*), hasta la planificación de la capacidad (Suplemento 7 del volumen *Decisiones Estratégicas*), la planificación de la localización (Capítulo 8 del volumen *Decisiones Estratégicas*), la programación (Capítulo 5 de este volumen) y la planificación del mantenimiento (Capítulo 7 de este volumen).

FUNDAMENTOS DE LA TOMA DE DECISIONES

Independientemente de lo compleja que sea una decisión o la sofisticación de la técnica utilizada para analizarla, todos los que toman decisiones se enfrentan a alternativas y a "estados de la naturaleza". En este módulo se va a utilizar la siguiente notación:

1. Términos:
   a. *Alternativa:* una línea de acción o estrategia que puede ser elegida por quien toma la decisión (por ejemplo, no llevar paraguas mañana).

[1] J. Hosseini, "Decision Analysis and Its Application in the Choice between Two Wildcat Ventures", *Interfaces,* vol. 16, n.º 2. Reproducido con autorización, INFORMS, 901 Elkridge Landing Road, Suite 400, Linthicum, Maryland 21090 USA.

b. *Estado de la naturaleza:* un acontecimiento o situación sobre el que tiene poco o ningún control el que toma la decisión (por ejemplo, el tiempo que va a hacer mañana).

2. Símbolos utilizados en un árbol de decisiones:

a. □ Nodo de decisión desde el cual se debe seleccionar una entre varias alternativas.

b. ○ Nodo de un estado de la naturaleza a partir del cual tendrá lugar un estado de la naturaleza.

"La dirección implica, en última instancia, la sustitución de la potencia y los músculos por el razonamiento, del folclore y la tradición por el conocimiento, y de la fuerza por la cooperación".
Peter Drucker

Para presentar las alternativas de decisión que tiene un directivo, podemos desarrollar un *árbol de decisión* utilizando los símbolos anteriores. Cuando se construye un árbol de decisión, se debe estar seguro de que todas las alternativas y estados de la naturaleza están en sus lugares lógicos y correctos y que se incluyen *todas* las posibles alternativas y estados de la naturaleza.

EJEMPLO A1

Un sencillo árbol de decisión

Getz Products Company está analizando la posibilidad de producir y comercializar cobertizos de almacenamiento para patios traseros de casas. Realizar este proyecto requeriría la construcción de una planta de fabricación o grande o pequeña. El mercado para el producto fabricado (cobertizos de almacenamiento) podría ser favorable o desfavorable. Naturalmente, Getz tiene la opción de no desarrollar la nueva línea de producto finalmente. En la Figura A.1 se presenta un árbol de decisión para esta situación.

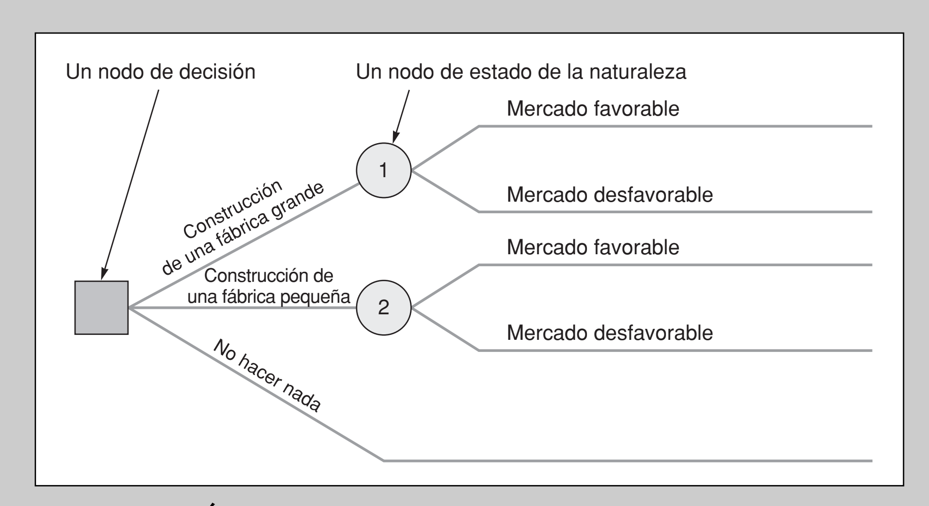


FIGURA A.1 ■ Árbol de decisión de Getz Products

TABLAS DE DECISIÓN

Para ayudar a Getz Products a definir sus alternativas, también podemos construir una tabla de decisión o resultados. Para cualquier alternativa y un determinado estado de la naturaleza, hay una *consecuencia* o *resultado*, que generalmente se expresa como un valor monetario. Esto se conoce como *valor condicional*. Observe que todas las alternativas del

Tabla de decisión
Procedimiento tabular para analizar alternativas de decisión y estados de la naturaleza.

Ejemplo A2 están relacionadas en la izquierda de la tabla, que los estados de la naturaleza figuran en la parte superior, y que los valores condicionales (resultados) están en el cuerpo de la **tabla de decisión**.

EJEMPLO A2

Una tabla de decisión

Construimos una tabla de decisión para Getz Products (Cuadro A1), que incluye valores condicionales basados en la siguiente información. Con un mercado favorable, una planta grande proporcionaría a Getz Products un beneficio neto de 200.000 dólares. Si el mercado es desfavorable, podría tener una pérdida neta de 180.000 dólares. Una planta pequeña proporcionaría un beneficio neto de 100.000 dólares en un mercado favorable, pero generaría una pérdida neta de 20.000 dólares si el mercado fuera desfavorable.

TABLA A.1 ■ Tabla de decisión con valores condicionales para Getz Products

	Estados de la naturaleza	
Alternativas	**Mercado favorable**	**Mercado desfavorable**
Construir una planta grande	200.000 dólares	−180.000 dólares
Construir una planta pequeña	100.000 dólares	−20.000 dólares
No hacer nada	0 dólares	−0 dólares

La parte más difícil de las tablas de decisión es la obtención de los datos para el análisis.

En los Ejemplos A3 y A4 veremos cómo utilizar las tablas de decisión.

TIPOS DE ENTORNO EN LA TOMA DE DECISIONES

Los tipos de decisiones que toma la gente dependen de la cantidad de información o de conocimientos que tengan sobre la situación. Hay tres tipos de entorno de toma de decisiones:

- Toma de decisiones bajo incertidumbre
- Toma de decisiones con riesgo
- Toma de decisiones con certeza

Toma de decisiones bajo incertidumbre

Cuando existe total *incertidumbre* sobre cuál de los estados de la naturaleza en el entorno de decisión puede presentarse (es decir, cuando no se puede ni siquiera asignar probabilidades a cada posible resultado), se cuenta con tres métodos de decisión:

Maximax
Criterio que halla una alternativa que maximiza el resultado máximo.

Maximin
Criterio que halla una alternativa que maximiza el resultado mínimo.

1. **Maximax.** Este método selecciona la alternativa que *max*imiza el resultado *máx*imo de cada una de las alternativas. En primer lugar, se halla el máximo resultado de cada alternativa, y después se elige la alternativa con el valor máximo. Como este criterio de decisión localiza la alternativa con *la mayor* posible *ganancia*, ha sido denominado criterio de decisión "optimista".
2. **Maximin.** Este método selecciona la alternativa que *maxi*miza el resultado *míni*mo de cada una de las alternativas. En primer lugar, se halla el resultado mínimo de cada alternativa, y después se escoge la alternativa con el valor máximo. Dado

que este criterio de decisión localiza la alternativa que tiene la *menor pérdida* posible, se lo ha denominado criterio de decisión "pesimista".

3. **Equiprobabilidad.** Este método halla la alternativa con el mayor resultado medio. En primer lugar, se calcula el resultado medio para cada alternativa, que es la suma de todos los resultados dividida por el número de resultados. Después, se escoge la alternativa con el valor más alto. El enfoque de equiprobabilidad supone que cada estado de la naturaleza tiene la misma probabilidad de ocurrir.

Equiprobabilidad
Criterio que asigna la misma probabilidad a cada estado de la naturaleza.

El Ejemplo A3 aplica cada uno de estos enfoques a Getz Products Company.

EJEMPLO A3

Un análisis de tabla de decisión bajo incertidumbre

Dada la tabla de decisión de Getz del Ejemplo A2, determine los criterios de decisión maximax, maximin y de equiprobabilidad (*véase* la Tabla A.2).

TABLA A.2 ■ Tabla de decisión para la toma de decisiones bajo incertidumbre

	Estados de la naturaleza				
Alternativas	Mercado favorable	Mercado desfavorable	Máximo de la fila	Mínimo de la fila	Media de la fila
Construir una planta grande	200.000 dólares	−180.000 dólares	200.000 dólares	−180.000 dólares	10.000 dólares
Construir una planta pequeña	100.000 dólares	−20.000 dólares	100.000 dólares	−20.000 dólares	40.000 dólares
No hacer nada	0 dólares	0 dólares	0 dólares	0 dólares	0 dólares
			Maximax	Maximin	Equiprobabilidad

Existen tomadores de decisión optimistas ("maximax") y otros pesimistas ("maximin"). Las opciones maximax y maximin presentan los escenarios de planificación del mejor y el peor de los casos.

1. La elección maximax consiste en construir una planta grande. Éste es el *máx*imo de los valores *máx*imos dentro de cada fila o alternativa.
2. La elección maximin consiste en no hacer nada. Éste es el *máx*imo de los valores *mín*imos de cada fila o alternativa.
3. La elección del criterio de equiprobabilidad consiste en construir una planta pequeña. Éste es el máximo de los valores medios de cada alternativa. Este enfoque supone que todos los resultados para cualquier alternativa son *igualmente probables*.

Toma de decisiones bajo riesgo

La toma de decisiones en situaciones de riesgo, que es el caso más habitual, se basa en las probabilidades. Pueden aparecer varios estados de la naturaleza, cada uno de ellos con una probabilidad estimada. Los estados de la naturaleza deben ser mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos y la suma de sus probabilidades debe ser 1[2]. Dada una tabla de decisión con valores condicionales y estimaciones de probabilidad para todos los estados de la naturaleza, se puede determinar el **valor monetario esperado (*Expected mone-***

Valor monetario esperado (EMV)
Valor o resultado esperado de una variable que tiene diferentes estados de la naturaleza posibles, cada uno con una probabilidad asociada.

[2] Para revisar este y otros términos estadísticos, *véase* CD-ROM Tutorial 1, "Statistical Review for Managers".

***tary value,* EMV)** para cada alternativa. Esta cifra representa el valor esperado o rendimiento *medio* de cada alternativa, *si pudiéramos repetir la decisión en un gran número de veces*.

El EMV para una alternativa es la suma de los posibles resultados de la alternativa, cada uno de ellos ponderado por la probabilidad de que ocurra.

$$\begin{aligned} \text{EMV (Alternativa } i) = & \text{ (Resultado del primer estado de la naturaleza)} \\ & \times \text{ (Probabilidad del primer estado de la naturaleza)} \\ & + \text{ (Resultado del segundo estado de la naturaleza)} \\ & \times \text{ (Probabilidad del segundo estado de la naturaleza)} \\ & + \cdots + \text{ (Resultado del último estado de la naturaleza)} \\ & \times \text{ (Probabilidad del último estado de la naturaleza).} \end{aligned}$$

El Ejemplo A4 muestra cómo se calcula el EMV máximo.

EJEMPLO A4



Valor monetario esperado

El director de operaciones de Getz Products cree que la probabilidad de un mercado favorable es exactamente la misma que la de un mercado desfavorable; esto es, que cada estado de la naturaleza tiene un 0,5 de probabilidad de ocurrir. Ahora se puede determinar el EMV para cada alternativa (*véase* la Tabla A.3):

1. EMV(A_1) = (0,5)(200.000 dólares) + (0,5)(−180.000 dólares) = 10.000 dólares
2. EMV(A_2) = (0,5)(100.000 dólares) + (0,5)(−20.000 dólares) = 40.000 dólares
3. EMV(A_3) = (0,5)(0 dólares) + (0,5)(0 dólares) = 0 dólares

El máximo EMV se encuentra en la alternativa A_2. Por tanto, según el criterio de decisión del EMV, se debe construir la planta pequeña.

TABLA A.3 ■ Tabla de decisión para Getz Products

	Estados de la naturaleza	
Alternativas	**Mercado favorable**	**Mercado desfavorable**
Construir una fábrica grande (A_1)	200.000 dólares	−180.000 dólares
Construir una fábrica pequeña (A_2)	100.000 dólares	−20.000 dólares
No hacer nada (A_3)	0 dólares	0 dólares
Probabilidades	0,50	0,50

Toma de decisiones bajo certeza

Suponga ahora que el director de operaciones de Getz es asesorado por una empresa de investigación de mercados que le propone ayudarle a tomar la decisión acerca de construir la planta para producir cobertizos. Los analistas afirman que sus análisis técnicos le dirán a Getz con certeza si el mercado es favorable al producto propuesto. En otras palabras, cambiará la situación de Getz y pasará de una toma de decisión *bajo riesgo* a una toma de decisión *bajo certeza*. Esta información podría impedir que Getz cometiera un error muy

caro. La empresa de investigación de mercados cobraría a Getz 65.000 dólares por la información. ¿Qué le recomendaría? ¿Debería el director de operaciones contratar a la empresa para que realizase el estudio? Aun cuando la información sea totalmente exacta, ¿vale 65.000 dólares? ¿Cuánto podría valer? Aunque algunas de estas preguntas son difíciles de contestar, puede resultar muy útil determinar el valor de esta *información perfecta*. Esto marca una cota superior de lo que usted estaría dispuesto a gastar en información, como la que le vende un consultor de mercado. Éste es el concepto del valor esperado de la información perfecta que introduciremos a continuación.

El EVPI marca el límite superior de lo que se debe pagar por una información.

Valor esperado de la información perfecta (EVPI)

Si un director pudiese determinar qué estado de la naturaleza va a tener lugar, entonces sabría qué decisión tomar. Una vez que un director sabe la decisión que debe tomar, mejora el resultado porque ahora el resultado es una certeza, y no una probabilidad. Debido a que el resultado aumentará si se sabe qué estado de la naturaleza tendrá lugar, este conocimiento tiene un valor. Por lo tanto, ahora veremos cómo determinar el valor de esta información. A la diferencia entre el resultado en condiciones de certeza y el resultado bajo riesgo se la denomina **valor esperado de la información perfecta (EVPI)**.

Valor esperado de la información perfecta (EVPI)
Es la diferencia entre el resultado bajo certeza y el resultado bajo riesgo.

$$\text{EVPI} = \text{Valor esperado bajo certeza} - \text{EMV máximo}$$

Para hallar el EVPI, hay que calcular primero el **valor esperado bajo certeza**, que es el resultado (media) esperado, si se ha tenido una información perfecta antes de tomar una decisión. Para calcular este valor, se elige la mejor alternativa para cada estado de la naturaleza y se multiplica su resultado por la probabilidad de ocurrencia de ese estado de la naturaleza.

Valor esperado bajo certeza
Es el resultado (medio) esperado si se dispone de información perfecta.

$$\begin{aligned}\text{Valor esperado bajo certeza} = {} & (\text{Mejor resultado o consecuencia en 1.}^{\text{er}}\text{ estado de la naturaleza}) \\ & \times (\text{Probabilidad del 1.}^{\text{er}}\text{ estado de la naturaleza}) \\ & + (\text{Mejor resultado para el 2.}^{\text{o}}\text{ estado de la naturaleza}) \\ & \times (\text{Probabilidad del 2.}^{\text{o}}\text{ estado de la naturaleza}) \\ & + \cdots + (\text{Mejor resultado para el último estado de la naturaleza}) \\ & \times (\text{probabilidad del último estado de la naturaleza})\end{aligned}$$

En el Ejemplo A5 utilizamos los datos y la tabla de decisión del Ejemplo A4 para examinar el valor esperado de la información perfecta.

EJEMPLO A5

Valor esperado de la información perfecta

Observando de nuevo la Tabla A.3, el director de operaciones de Getz puede calcular el máximo que estaría dispuesto a pagar por la información (es decir, el valor esperado de la información perfecta, o EVPI). Sigue un proceso en dos etapas. En primer lugar, se calcula el valor esperado bajo certeza. A continuación, empleando esta información, se calcula el EVPI. El procedimiento se explica de la siguiente manera:

1. El mejor resultado para el estado de la naturaleza "mercado favorable" es "construir una planta grande" con un resultado de 200.000 dólares. El mejor resultado correspondiente al estado de la naturaleza "mercado desfavorable" es "no hacer nada", con un resul-

tado de 0 dólares. El valor esperado bajo certeza = (200.000 dólares)(0,5) + ((0 dólares)(0,5) = 100.000 dólares. Así, si tuviéramos información perfecta, esperaríamos (en promedio) un resultado de 100.000 dólares si la decisión pudiera ser repetida muchas veces.

2. El máximo EMV es de 40.000 dólares, que es el resultado esperado sin información perfecta. Así:

$$\begin{aligned} \text{EVPI} &= \text{Valor esperado bajo certeza} - \text{EMV máximo} \\ &= 100.000 \text{ dólares} - 40.000 \text{ dólares} = 60.000 \text{ dólares} \end{aligned}$$

En otras palabras, lo *máximo* que Getz debería estar dispuesto a pagar por la información perfecta son 60.000 dólares. Esta conclusión, naturalmente, está basada en el supuesto de que la probabilidad de cada estado de la naturaleza es de 0,50.

ÁRBOLES DE DECISIÓN

Árbol de decisión
Medio gráfico para analizar las alternativas de decisión y los estados de la naturaleza.

Toda decisión que se pueda representar con una tabla de decisión también se puede representar con un árbol de decisión. Por ello, se van a analizar algunas decisiones utilizando árboles de decisión. Aunque la utilización de una tabla de decisión es práctica en los problemas que presentan un conjunto de decisiones y un conjunto de estados de la naturaleza, muchos problemas incluyen decisiones y estados de la naturaleza *secuenciales***.** Cuando existen dos o más decisiones secuenciales y las decisiones posteriores se basan en el resultado de las anteriores, resulta adecuado utilizar el enfoque de árbol de decisión. Un **árbol de decisión** es una representación gráfica del proceso de decisión que indica las alternativas de decisión, los estados de la naturaleza y sus respectivas probabilidades, y los resultados para cada combinación de alternativa de decisión y estado de la naturaleza.

El valor monetario esperado (EMV) es el criterio que se emplea más habitualmente para el análisis con árboles de decisión. Una de las primeras etapas de este análisis consiste en representar gráficamente el árbol de decisión y especificar las consecuencias monetarias de todos los resultados para un problema concreto.

El análisis de problemas con *árboles de decisión* presenta cinco etapas:

1. Definir el problema.
2. Construir o dibujar el árbol de decisión.
3. Asignar probabilidades a los estados de la naturaleza.
4. Estimar los resultados para cada posible combinación de alternativas de decisión y estados de la naturaleza.
5. Resolver el problema calculando los valores monetarios esperados (EMV) para cada nodo de un estado de la naturaleza. Esto se realiza trabajando *hacia atrás,* es decir, empezando por la derecha del árbol y volviendo hacia atrás hasta los nodos de decisión de la izquierda.

Existe un uso generalizado de los árboles de decisión más allá del marco de la dirección de operaciones. Los directivos frecuentemente valoran una presentación gráfica de los problemas complicados.

Un árbol de decisión más complejo

Cuando se tiene que tomar una *secuencia* de decisiones, los árboles de decisión son herramientas más potentes que las tablas de decisión. Supongamos que Getz Products tiene que tomar dos decisiones, y que la segunda decisión depende del resultado de la primera. Antes de decidir la construcción de una nueva planta, Getz tiene la opción de realizar su propio

EJEMPLO A6

Resolución de un árbol de decisión utilizando el EMV

En la Figura A.2 se presenta un árbol de decisión completo y resuelto para Getz Products. Observe que los resultados están colocados en la parte derecha de cada una de las ramas del árbol. Las probabilidades (utilizadas por primera vez por Getz en el Ejemplo A4) se colocan entre paréntesis junto a cada estado de la naturaleza. Los valores monetarios esperados para cada nodo de estado de la naturaleza se calculan y se sitúan en sus respectivos nodos. El EMV para el primer nodo es de 10.000 dólares. Esto representa la rama del nodo de decisión consistente en "construir una planta grande". El EMV del nodo 2, "construir una planta pequeña", es de 40.000 dólares. La opción de "no hacer nada" tiene, evidentemente, un resultado de 0 dólares. Se escogerá la rama que, partiendo del nodo de decisión (inicio del arbol), conduzca al nodo de estado de la naturaleza con mayor EMV. En el caso de Getz, se debería construir una planta pequeña.

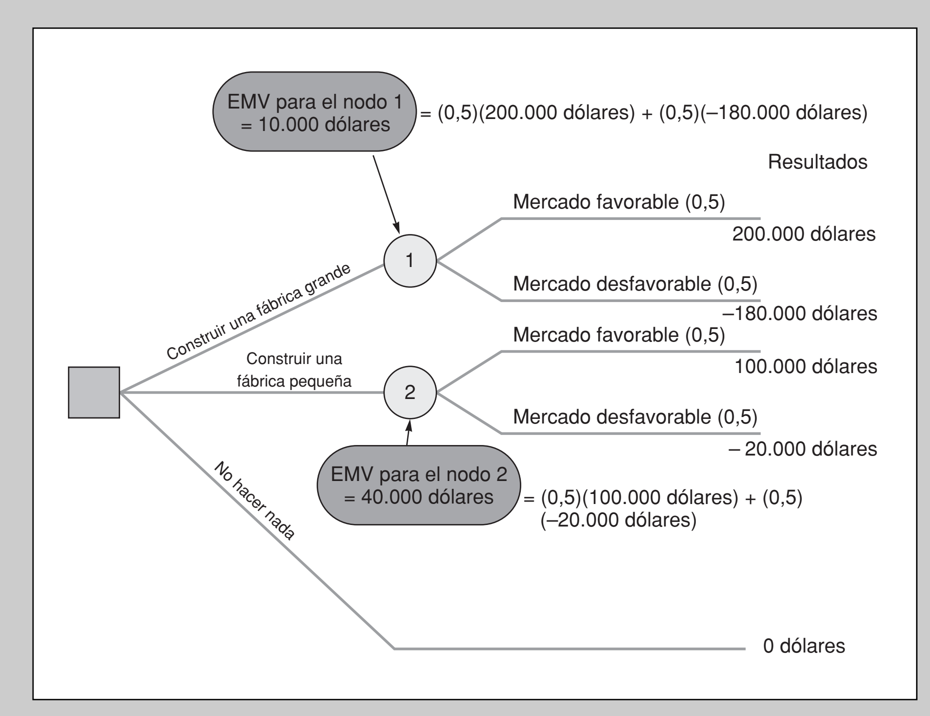


FIGURA A.2 ■ Árbol de decisión completo y resuelto para Getz Products

El software de árbol de decisión es un avance relativamente nuevo que permite a los usuarios resolver problemas de análisis de decisiones con flexibilidad, potencia, y facilidad. Programas como DPL, Tree Plan, y Supertree permiten analizar los problemas de decisión con menos esfuerzo y en mayor profundidad que nunca anteriormente. La presentación a todo color de las opciones disponibles para los directivos siempre causa impacto. En esta foto, las opciones de perforación petrolífera exploratoria de Tomco Oil, presentadas en la fotografía del principio del capítulo, se analizan con DPL, un producto de Syncopation Software.

estudio de mercado, con un coste de 10.000 dólares. La información de este estudio podría ayudar a la empresa a tomar la decisión de construir una planta grande, una planta pequeña o no construirla. Getz reconoce que, aunque este estudio no le proporcionará una información *perfecta*, podría serle de gran utilidad.

El nuevo árbol de decisión de Getz se representa en la Figura A.3 del Ejemplo A7. Analice detenidamente este árbol más complejo. Observe que *todos los resultados y alternativas posibles* se incluyen en su secuencia lógica. Este procedimiento es una de las potencias del empleo de árboles de decisión. El director se ve obligado a examinar todos los resultados posibles, incluyendo los desfavorables. También se ve obligado a tomar decisiones de forma lógica y secuencial.

EJEMPLO A7

Un árbol de decisión con decisiones secuenciales

Analizando el árbol de la Figura A.3 se ve que el primer punto de decisión de Getz consiste en determinar si debe realizar o no el estudio de mercado con coste de 10.000 dólares. Si decide no realizar el estudio (parte inferior del árbol), puede construir una planta grande, una pequeña o no construir ninguna. Éste es el segundo punto de decisión de Getz. Si la decisión es construir, el mercado puede ser favorable (con una probabilidad de 0,50) o desfavorable (también con una probabilidad de 0,50). Los resultados para cada una de las posibles decisiones se especifican en la parte derecha del árbol. De hecho, esta parte derecha del árbol de Getz es *idéntica* al árbol de decisión más simple que se muestra en la Figura A.2.

La parte superior de la Figura A.3 refleja la decisión de realizar el estudio de mercado. El nodo de estado de la naturaleza número 1 tiene dos ramas que salen de él. Digamos que hay una

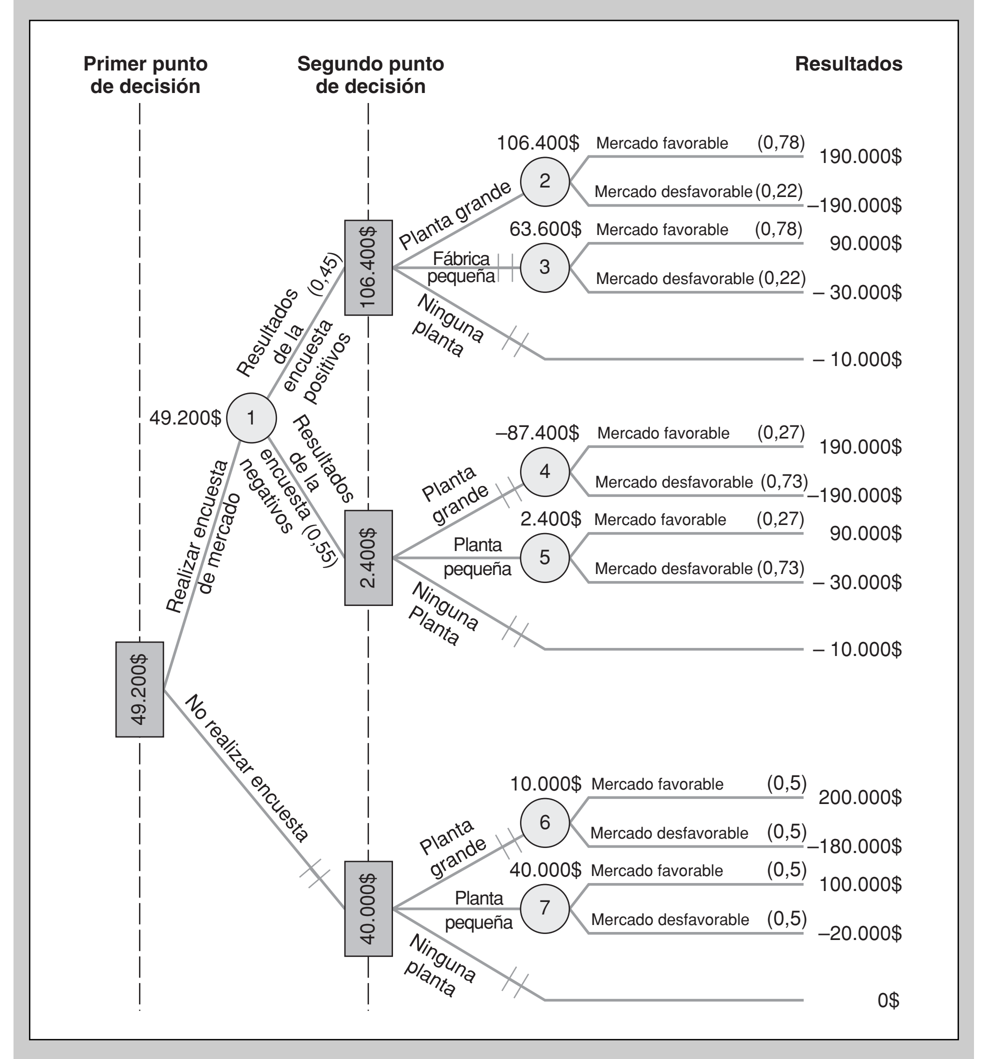


FIGURA A.3 ■ Árbol de decisión de Getz Products que muestra las probabilidades y los VME

Las líneas paralelas cortas significan que la rama tiene que ser "podada", lo que quiere decir que es menos favorable que otra opción posible y, por tanto, se puede abandonar.

probabilidad del 45 por ciento de que los resultados del estudio indiquen un mercado favorable para los cobertizos de almacenamiento. Observe también que la probabilidad de que los resultados del estudio sean negativos es de 0,55.

El resto de las probabilidades indicadas entre paréntesis en la Figura A.3 son todas probabilidades *condicionales***.** Por ejemplo, 0,78 es la probabilidad de un mercado favorable para los cobertizos, supuesto un resultado favorable en el estudio de mercado. Obviamente, se esperaría encontrar una probabilidad elevada de un mercado favorable dado que el estudio indicó que el mercado sería bueno. No obstante, no hay que olvidar que existe una posibilidad de que el estudio de mercado de Getz de 10.000 dólares no proporcione una información perfecta y ni siquiera fiable. Cualquier estudio de mercado está sujeto a error. En este caso, continúa existiendo un 22 por ciento de probabilidad de que el mercado para los cobertizos sea desfavorable incluso con los resultados positivos del estudio.

Se puede reducir la complejidad considerando y resolviendo un conjunto de árboles más pequeños: empiece por el final de las ramas de uno grande. Tome una decisión cada vez.

Asimismo, signifiquemos que hay un 27 por ciento de probabilidad de que el mercado de los cobertizos sea favorable, aunque el resultado del estudio de Getz haya sido negativo. La probabilidad es mucho mayor, 0,73, de que el mercado sea realmente desfavorable cuando el estudio de mercado es negativo.

Finalmente, cuando se observa la columna de resultados de la Figura A.3, se ve que hemos restado de cada una de las 10 ramas superiores del árbol la cantidad de 10.000 dólares, correspondiente al coste del estudio de mercado. Por tanto, una planta grande construida con un mercado favorable, normalmente, proporcionaría un beneficio neto de 200.000 dólares. Pero, debido a que se ha realizado un estudio de mercado, esta cifra se reduce en 10.000 dólares. En el caso desfavorable, la pérdida de 180.000 dólares se incrementaría hasta 190.000 dólares. Análogamente, si se realizase el estudio y no se construyese *ninguna planta* se generaría un resultado de −10.000 dólares.

Con todas las probabilidades y los resultados especificados, se puede empezar el cálculo del valor monetario esperado para cada una de las ramas. Se comienza en el extremo o parte derecha del árbol de decisión y se trabaja, hacia atrás, hacia el origen. Cuando acabemos, se podrá conocer la mejor decisión.

1. Dados unos resultados favorables del estudio,

EMV (nodo 2) = (0,78)(190.000 dólares) + (0,22)(−190,000 dólares) = 106.400 dólares

EMV (nodo 3) = (0,78)(90.000 dólares) + (0,22)(−30.000 dólares) = 63.600 dólares

El EMV, de no construir una planta, en este caso es −10.000 dólares. Por tanto, si los resultados del estudio son favorables, debería construirse una planta grande.

2. Dados unos resultados negativos del estudio,

EMV (nodo 4) = (0,27)(190.000 dólares) + (0,73)(−190.000 dólares) = −87.400 dólares

EMV (nodo 5) = (0,27)(90.000 dólares) + (0,73)(−30.000 dólares) = 2.400 dólares

El EMV, de no construir una planta, es nuevamente de −10.000 dólares para esta rama. Por tanto, supuesto un resultado negativo del estudio, Getz debería construir una planta pequeña con un valor esperado de 2.400 dólares.

3. Continuando por la parte superior del árbol y con moviéndonos hacia atrás, se calcula el valor esperado de realizar el estudio de mercado.

EMV (nodo 1) = (0,45)(106.400 dólares) + (0,55)(2.400 dólares) = 49.200 dólares

4. Si *no* se realiza el estudio de mercado,

EMV (nodo 6) = (0,50)(200.000 dólares) + (0,50)(−180.000 dólares) = 10.000 dólares

EMV (nodo 7) = (0,50)(100.000 dólares) + (0,50)(−20.000 dólares) = 40.000 dólares

El EMV, de no construir una planta, es de 0 dólares. Si no se realiza el estudio de mercado, la mejor decisión es construir una planta pequeña.

5. Dado que el valor monetario esperado, de realizar el estudio, es de 49.200 dólares, frente a un EMV de 40.000 dólares en caso de no realizarlo, la mejor decisión es *buscar información sobre el mercado*. Si los resultados del estudio son favorables, Getz debería construir la planta grande; pero si la investigación es negativa, debería construir la planta pequeña.

Utilización de los árboles de decisión en la toma de decisiones éticas

Los árboles de decisión también pueden ser una herramienta útil para ayudar a tomar decisiones corporativas éticas. El árbol de decisión presentado en el Ejemplo A8, desarrollado por la profesora de Harvard Constance Bagley, proporciona una guía sobre cómo los direc-

EJEMPLO A8

Toma de decisiones éticas

Smithson Corp. está abriendo una planta en Malasia, un país con una legislación medioambiental mucho más laxa que la de Estados Unidos, su país de origen. Smithson puede ahorrar 18 millones de dólares en la construcción de la instalación, y aumentar sus beneficios, si no instala los equipos de control de la contaminación que son obligatorios en Estados Unidos, pero no en Malasia. Pero Smithson también calcula que los residuos contaminantes que emitiría la planta, si no se depuran, podrían perjudicar a la industria de pesca local. Esto podría provocar una pérdida de millones de dólares así como crear problemas de salud para la población local.

La Figura A4 explica resumidamente las decisiones que puede contemplar la dirección. Por ejemplo, si en opinión de la dirección el perjuicio provocado a la comunidad malasia construyendo la planta será mayor que la pérdida en los resultados de la empresa, la respuesta a la pregunta "¿Es ético?" será negativa.

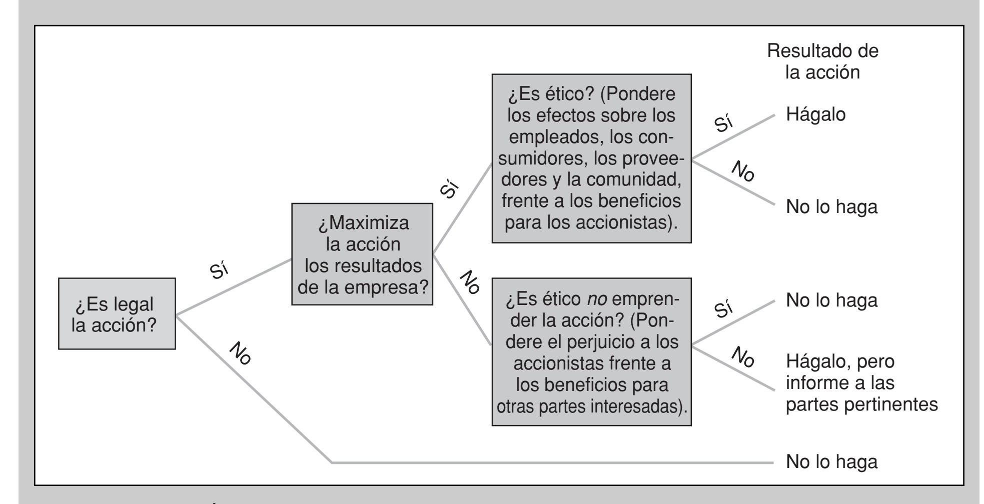


FIGURA A.4 ■ Árbol de decisión para el dilema ético de Smithson

Fuente: Modificado de Constance E. Bagley, "The Ethical Leader's Decision Tree", *Harvard Business Review* (enero-febrero de 2003): 18-19.

Ahora bien, imagine que Smithson propone construir una planta un tanto distinta, una *con* controles de la contaminación, a pesar del impacto negativo en los rendimientos de la empresa. Esa decisión nos lleva la rama "¿Es ético *no* emprender la acción?" Si la respuesta (por la razón que sea) es negativa, el árbol de decisión sugiere que hay que proceder a construir la planta, pero notificando al Consejo de Smithson, a los accionistas y a otras partes interesadas sobre cuál será su impacto.

tivos pueden al mismo tiempo maximizar el valor para los accionistas y comportarse éticamente. El árbol se puede aplicar a cualquier acción que esté contemplando una empresa, ya sea la expansión de las operaciones en un país en desarrollo o una reducción de plantilla en su sede nacional.

Las decisiones éticas pueden ser muy complejas. ¿Qué ocurre, por ejemplo, si una empresa construye una fábrica contaminante en el extranjero, pero permite a la empresa vender un medicamento que salva vidas a un coste menor en todo el mundo? ¿Se puede utilizar un árbol de decisión para abordar todos los posibles dilemas éticos? No, pero sí proporciona a los directivos un marco para analizar esas decisiones.

RESUMEN

Este módulo examina dos de las técnicas de decisión de más amplia utilización: las tablas de decisión y los árboles de decisión. Estas técnicas son especialmente útiles para tomar decisiones bajo riesgo. Muchas decisiones sobre investigación y desarrollo, de plantas y equipos, e incluso de edificios nuevos y estructuras se pueden analizar con estos modelos de decisión. Los problemas de control de inventario, planificación agregada, mantenimiento, programación y control de la producción son sólo algunas de otras aplicaciones posibles de las tablas y de los árboles de decisión.

TÉRMINOS CLAVE

Tabla de decisión *(p. 310)*
Maximax *(p. 310)*
Maximin *(p. 310)*
Equiprobabilidad *(p. 311)*
Valor monetario esperado (EMV) *(p. 311)*
Valor esperado de la información perfecta (EVPI) *(p. 313)*
Valor esperado bajo certeza *(p. 313)*
Árbol de decisión *(p. 314)*

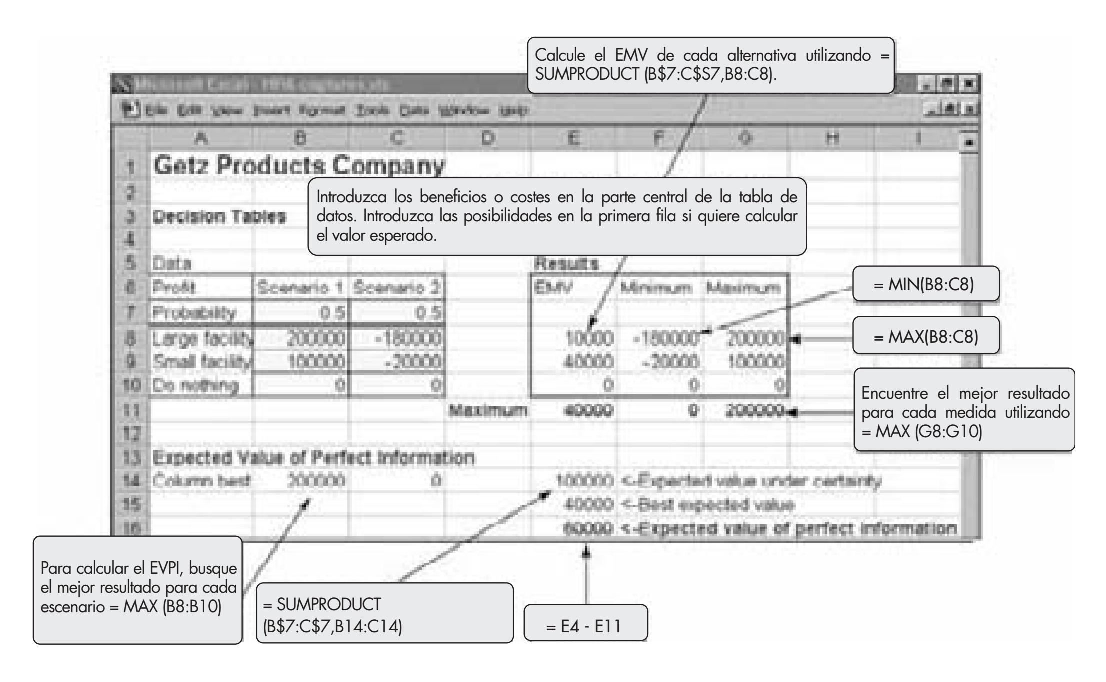
CÓMO UTILIZAR EL SOFTWARE PARA LOS MODELOS DE DECISIÓN

El análisis de las tablas de decisión es sencillo con Excel, Excel OM y POM para Windows. Cuando hay que utilizar árboles de decisión, hay programas informáticos como DPL, Tree Plan y Supertree que ofrecen flexibilidad, potencia y facilidad de uso. POM para Windows también puede analizar árboles, pero no tiene opciones gráficas.



Cómo utilizar Excel OM

Excel OM permite evaluar rápidamente las decisiones y realizar análisis de sensibilidad de los resultados. El Programa A.1 utiliza los datos de Getz para ilustrar input, output y fórmulas seleccionadas que se necesitan para calcular los valores del EMV y del EVPI.



PROGRAMA A.1 ■ Utilizar Excel OM para calcular el EMV y otros indicadores para Getz



Cómo utilizar POM para Windows

Se puede utilizar el programa POM para Windows para calcular toda la información descrita en las tablas de decisión y en los árboles de decisión de este módulo. Para ver más información sobre la forma de utilizar este software consulte el Apéndice IV.



PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto A.1

Stella Yan Hua está considerando la posibilidad de abrir una pequeña tienda de ropa en la avenida Fairbanks, situada a muy poca distancia de la universidad. Ha localizado un buen centro comercial que gusta a los estudiantes. Sus opciones son abrir una tienda pequeña, una de tamaño mediano o no abrir ninguna. El mercado para una tienda de ropa puede ser bueno, mediano o malo. Las probabilidades para estas tres posibilidades son 0,2 para un buen mercado, 0,5 para un mercado de tipo medio y 0,3 para un mercado malo. Los beneficios o pérdidas netas para las tiendas pequeñas o de tamaño mediano en las diferentes condiciones del mercado se recogen en la tabla siguiente. Si no se construye ninguna tienda no se producen pérdidas ni ganancias. ¿Qué recomendaría?

Alternativas	Mercado bueno (dólares)	Mercado medio (dólares)	Mercado malo (dólares)
Tienda pequeña	75.000	25.000	−40.000
Tienda mediana	100.000	35.000	−60.000
Ninguna tienda	0	0	0
Probabilidades	0,20	0,50	0,30

Solución

Se puede resolver el problema calculando el valor monetario esperado (EMV) para cada alternativa.

EMV (Tienda pequeña) = (0,2)(75.000 dólares) + (0,5)(25.0000 dólares) + (0,3)(−40.000 dólares)
= 15.500 dólares

EMV (Tienda mediana) = (0,2)(100.000 dólares) + (0,5)(35.000 dólares) + (0,3)(−60.000 dólares)
= 19.500 dólares

EMV (ninguna tienda) = (0,2)(0 dólares) + (0,5)(0 dólares) + (0,3)(0 dólares) = 0 dólares

Como se puede ver, la mejor decisión es construir una tienda de tamaño mediano. El VME para esta alternativa es de 19.500 dólares.

Problema Resuelto A.2

La demanda diaria de cajas de quitamanchas Tidy Bowl en el supermercado de Ravinder Nath siempre ha sido de 5, 6 o 7 cajas. Desarrolle un árbol de decisión que ilustre sus alternativas de decisión para decidir si tener un stock de 5, 6 o 7 cajas.

Solución

El árbol de decisión se muestra en la Figura A.5.

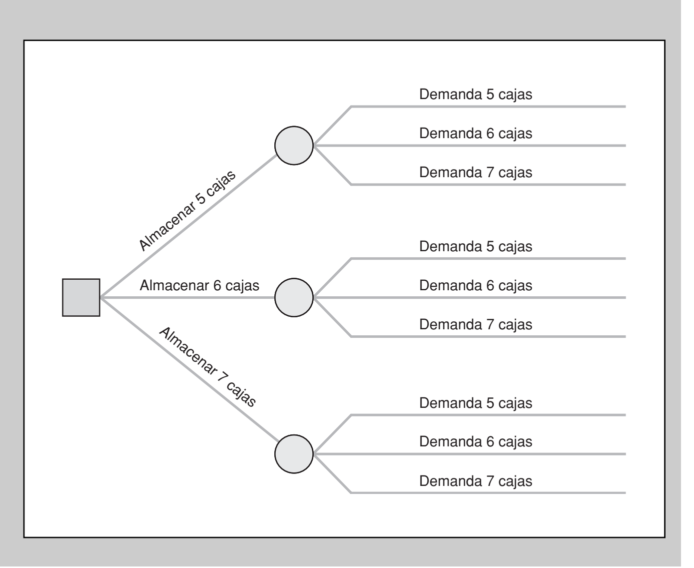


FIGURA A.5 ■ Demanda en el supermercado de Ravinder Nath

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.

 En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Problemas en Internet
- Caso de estudio en Internet

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Excel OM
- Archivo de datos para el ejemplo de Excel OM
- POM para Windows



CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. Identifique los seis pasos de un proceso de decisión.
2. Ofrezca un ejemplo de una buena decisión que haya tomado y que haya derivado en un mal resultado. Ofrezca también un ejemplo de una mala decisión que tomó y que dio lugar a un buen resultado. ¿Por qué era mala o buena cada una de las decisiones?
3. ¿Cuál es el modelo de decisión de *equiprobabilidad*?
4. Analice las diferencias entre la toma de decisiones bajo certeza, bajo riesgo, o bajo incertidumbre.
5. ¿Qué es un árbol de decisión?
6. Explique cómo se pueden utilizar los árboles de decisión en varias de las 10 decisiones de dirección de operaciones.
7. ¿Cuál es el valor esperado de la información perfecta?
8. ¿Cuál es el valor esperado bajo certeza?
9. Identifique los cinco pasos para analizar un problema utilizando un árbol de decisión.
10. ¿Por qué se considera que las estrategias maximax y maximin son optimista y pesimista, respectivamente?
11. Se considera que el criterio del valor esperado es un criterio racional en el que basar una decisión. ¿Es cierto? ¿Es racional para considerar el riesgo?
12. ¿Cuándo resultan más útiles los árboles de decisión?



PROBLEMAS*

•  **A.1.** Dada la siguiente tabla de valores condicionales, determine la decisión adecuada en condiciones de incertidumbre, utilizando:

a) Maximax
b) Maximin
c) Equiprobabilidad

	Estados de la naturaleza		
Alternativas	**Mercado muy favorable**	**Mercado medio**	**Mercado desfavorable**
Construir nueva planta	350.000$	240.000$	−300.000$
Subcontratación	180.000$	90.000$	−20.000$
Horas extraordinarias	110.000$	60.000$	−10.000$
No hacer nada	0$	0$	0$

⁝  **A.2.** Aunque las gasolineras independientes han pasado por un periodo difícil, Susan Helms ha estado pensando montar su propia gasolinera independiente. Su problema es decidir el tamaño que debe tener la gasolinera. Los ingresos anuales dependerán tanto del tamaño de su estación como de determinado número de factores del mercado relacionados con la industria petrolífera y con la demanda de gasolina. Después de un cuidadoso análisis, Susan desarrolló la siguiente tabla:

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; significa que se puede resolver el problema con Excel OM; significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

Tamaño de la primera estación	Mercado favorable (dólares)	Mercado medio (dólares)	Mercado desfavorable (dólares)
Pequeña	50.000	20.000	−10.000
Mediana	80.000	30.000	−20.000
Grande	100.000	30.000	−40.000
Muy grande	300.000	25.000	−160.000

Por ejemplo, si Susan construye una estación de servicio pequeña y el mercado es favorable, obtendrá un beneficio de 50.000 dólares.

a) Desarrolle una tabla de decisión para esta decisión.
b) ¿Cuál es la decisión con el criterio maximax?
c) ¿Cuál es la decisión con el criterio maximin?
d) ¿Cuál es la decisión con el criterio de equiprobabilidad?

• P **A.3.** Clay Whybark, un vendedor de refrescos en el festival anual Rockfest del Hard Rock Café, creó una tabla de valores condicionales para las diversas alternativas (decisión sobre existencias) y estados de la naturaleza (cantidad de público).

	Estados de la naturaleza (demanda)		
Alternativas	**Grande**	**Media**	**Baja**
Inventario alto	22.000 dólares	12.000 dólares	−2.000 dólares
Inventario intermedio	14.000 dólares	10.000 dólares	6.000 dólares
Inventario bajo	9.000 dólares	8.000 dólares	4.000 dólares

Si las probabilidades asociadas a los estados de la naturaleza son de 0,3 para una demanda grande, de 0,5 para una demanda media y de 0,2 para una demanda pequeña, determine la alternativa que proporcione el mayor valor monetario esperado (EMV).

• P **A.4.** En el Problema A.3 calcule el valor esperado de la información perfecta (EVPI).

• P **A.5.** H. Weiss, Inc., está considerando fabricar un nuevo dispositivo de escaneo para los aeropuertos. Los directivos creen que existe una probabilidad de 0,4 de que la empresa ATR Co. saque al mercado un producto que le haga la competencia. Si Weiss agrega una línea de ensamblaje para el nuevo producto y ATR no saca al mercado un producto competitivo, el beneficio esperado de Weiss es de 40.000 dólares; si Weiss añade dicha línea de ensamblaje y ATR también lo hace, Weiss todavía espera un beneficio de 10.000 dólares. Si Weiss construye una nueva fábrica adicional y ATR no produce un producto competitivo, Weiss espera un beneficio de 600.000 dólares; si ATR compite por conseguir este mercado, Weiss espera una pérdida de 100.000 dólares.

Calcule el VME de cada decisión.

• P **A.6.** En el Problema A.5 calcule el valor esperado de la información perfecta.

• P **A.7.** La siguiente tabla de resultados recoge los beneficios de diferentes alternativas de decisión y diferentes niveles de demanda en la empresa de software de Amber Gardner:

	Demanda	
	Baja	Alta
Alternativa 1	10.000 dólares	30.000 dólares
Alternativa 2	5.000 dólares	40.000 dólares
Alternativa 3	−2.000 dólares	50.000 dólares

La probabilidad de demanda baja es de 0,4, mientras que la probabilidad de demanda alta es de 0,6.

a) ¿Cuál es el valor monetario esperado posible más alto?
b) ¿Cuál es el valor esperado bajo certeza?
c) Calcule el valor esperado de la información perfecta para esta situación.

• P **A.8.** Leah Johnson, directora del bufete de abogados Legal Services de Brookline, quiere aumentar su capacidad para proporcionar asesoramiento jurídico gratis, pero debe decidir si lo hace contratando a otro abogado con dedicación completa o empleando abogados a tiempo parcial. La siguiente tabla muestra los *costes* esperados de las dos opciones para tres posibles niveles de demanda:

	Estados de la naturaleza		
Alternativas	Demanda baja	Demanda media	Demanda alta
Contrato con dedicación completa	300 dólares	500 dólares	700 dólares
Contrato a tiempo parcial	0 dólares	350 dólares	1.000 dólares
Probabilidades	0,2	0,5	0,3

Utilizando el valor esperado, ¿qué debería hacer la señora Johnson?

: P **A.9.** Chung Manufacturing está analizando la posibilidad de sacar al mercado una familia de nuevos productos. La demanda a largo plazo del grupo de productos es un tanto predecible, así que al productor le preocupa el riesgo de elegir un proceso inadecuado. Chen Chung es el VP (vicepresidente) de operaciones. Puede elegir entre producir por lotes, producir de forma personalizada, o puede invertir en tecnología de grupos. Chen no podrá predecir la demanda con precisión hasta que haya tomado la decisión sobre el proceso. La demanda se clasificará en cuatro grupos: mala, moderada, buena y excelente. La siguiente tabla indica los resultados (beneficios) asociados con cada combinación de proceso y demanda, así como las probabilidades de cada nivel de demanda a largo plazo.

	Mala	Moderada	Buena	Excelente
Probabilidad	0,1	0,4	0,3	0,2
Lotes	−200.000 $	1.000.000 $	1.200.000 $	1.300.000 $
Personalizado	100.000 $	300.000 $	700.000 $	800.000 $
Tecnología de grupos	−1.000.000 $	−500.000 $	500.000 $	2.000.000 $

a) Basándose en el valor esperado, ¿qué decisión ofrece la mayor ganancia?
b) ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar Chen Chung por una previsión que determinase con precisión el nivel de demanda en el futuro?

• P **A.10.** La empresa de Julie Resler está considerando la expansión de sus instalaciones actuales para satisfacer una demanda creciente. Si en el futuro la demanda es alta, una gran ampliación daría como resultado un beneficio adicional de 800.000 dólares, pero si la demanda es baja, habría una pérdida de 500.000 dólares. Si la demanda es alta, una pequeña ampliación proporcionaría un beneficio de 200.000 dólares, pero si la demanda es baja, existiría una pérdida de 100.000 dólares. La empresa tiene la opción de no realizar la ampliación. Si hay una probabilidad del 50 por ciento de que la demanda sea alta, ¿qué debe hacer la empresa para maximizar el beneficio medio a largo plazo?

: P **A.11.** La librería de la Universidad de Dallas almacena libros de texto en preparación para las ventas de cada semestre. Normalmente recurre a las previsiones de los departamentos y a los registros de prematriculación para determinar el número de copias que se necesita de cada texto. Los registros de prematriculación muestran que hay 90 alumnos de dirección de operaciones, pero el director de la librería, Curtis Ketterman, tiene su propia opinión a partir de su intuición y de algunos datos históricos. Curtis cree que la distribución de las ventas puede ir de 70 a 90 unidades, siguiendo el siguiente modelo de probabilidad:

Demanda	70	75	80	85	90
Probabilidad	0,15	0,30	0,30	0,20	0,05

Este libro de texto cuesta a la librería 82 dólares, y se vende por 112. Cualquier copia sin vender puede devolverse a la editorial, menos una comisión de devolución y envío, con un importe de devolución neto de 36 dólares.

a) Construya la tabla de los beneficios condicionales.
b) ¿Cuántas copias debe almacenar la librería para lograr el mayor valor esperado?

: P **A.12.** Palmer Cheese Company es un pequeño fabricante de diferentes productos de queso. Un producto es un queso para untar que se vende a minoristas. Susan Palmer debe decidir cuántas cajas de queso para untar debe fabricar al mes. La probabilidad de que la demanda sea de 6 cajas es de 0,1, de 7 cajas es de 0,3, de 8 cajas es de 0,5 y de 9 cajas es de 0,1. El coste de cada caja es de 45 dólares y el precio que obtiene Susan por la venta de cada una de ellas es de 95 dólares. Desgraciadamente, las cajas no vendidas a fin de mes no valen nada ya que se estropean. ¿Cuántas cajas debería fabricar Susan cada mes?

⋮ P **A.13.** Ronald Lau, ingeniero jefe de South Dakota Electronics, tiene que decidir si construye una nueva instalación de procesado de tecnología puntera. Si la nueva instalación funciona correctamente, la empresa podría obtener un beneficio de 200.000 dólares. Si la nueva instalación falla, South Dakota Electronics podría perder 180.000 dólares. En ese momento, Lau estima que hay un 60 por ciento de probabilidad de que falle el nuevo proceso.

La otra opción consiste en construir una planta piloto y luego decidir si se construye o no una instalación completa. La construcción de la planta piloto costaría 10.000 dólares. Lau estima que hay un 50 por ciento de probabilidad de que la planta piloto funcione correctamente. Si la planta piloto funciona, hay un 90 por ciento de probabilidad de que la planta completa, si se construye, funcione también. Si la fábrica piloto no funciona, sólo existe un 20 por ciento de probabilidad de que el proyecto completo (si se construye) funcione. Lau se enfrenta a un dilema. ¿Debería construir la planta? ¿Debería construir la planta piloto y tomar entonces la decisión? Ayude a Lau a analizar este problema.

A.14. Karen Villagomez, presidente de Wright Industries, está considerando si construir o no una planta manufacturera en Ozarks. Su decisión se resume en la siguiente tabla:

Alternativas	Mercado favorable	Mercado desfavorable
Construir una planta grande	400.000 dólares	−300.000 dólares
Construir una planta pequeña	80.000 dólares	−10.000 dólares
No construir	0 dólares	0 dólares
Probabilidades del mercado	0,4	0,6

a) Construya un árbol de decisión.
b) Determine la mejor estrategia, empleando el valor monetario esperado (EMV).
c) ¿Cuál es el valor esperado de la información perfecta (EVPI)?

A.15. Deborah Kellogg compra alcoholímetros para el Departamento de Policía de Denver. La calidad de los dispositivos de cada uno de sus dos proveedores se indica en la siguiente tabla:

Porcentaje de defectuosos	Probabilidad para Loomba Technology	Probabilidad para Stewart-Douglas Enterprises
1	0,70	0,30
3	0,20	0,40
5	0,10	0,30

Por ejemplo, la probabilidad de recibir un lote de dispositivos procedente de Loomba Technology en el que haya un 1 por ciento de defectuosos, es de 0,70. Como los pedidos que realiza Kellogg son de 10.000 dispositivos por cada pedido, si el pedido lo suministra Loomba Technolgy, eso significaría que existe una probabilidad de 0,7 de recibir 100 dispositivos defectuosos de los 10.000. Se puede reparar un dispositivo defectuoso por 0,50 dólares. Aunque la calidad de Stewart-Douglas Enterprises es más baja, vendería un pedido de 10.000 dispositivos por 37 dólares menos que Loomba.

a) Desarrolle un árbol de decisión
b) ¿Qué proveedor debería utilizar Kellogg?

A.16. Deborah Hollwager, concesionaria del estadio de béisbol de Des Moines, ha desarrollado una tabla de decisiones condicionales para las diversas alternativas (decisión de almacenamiento) y estados de la naturaleza (cantidad de público asistente).

	Estados de la naturaleza (público asistente)		
Alternativas	Mucho	Medio	Poco
Inventario alto	200.000 dólares	10.000 dólares	−2.000 dólares
Inventario intermedio	15.000 dólares	12.000 dólares	6.000 dólares
Inventario bajo	9.000 dólares	6.000 dólares	5.000 dólares

Si las probabilidades asociadas con los estados de la naturaleza son de 0,3 para asistencia de público alta, de 0,5 para asistencia media y de 0,2 para poca asistencia, determine:

a) La alternativa que proporciona el mayor valor monetario esperado (EMV).
b) El valor esperado de la información perfecta (VEIP).

• P **A.17.** Joseph Biggs es propietario de un puesto de venta de helados y vive a 45 kilómetros de una playa turística de California. La venta de helados depende en gran medida de su localización y del tiempo que haga. En la playa turística, su beneficio ascenderá a 120 dólares al día si hace buen tiempo, y a 10 dólares si hace mal tiempo. En su lugar de residencia, el beneficio será de 70 dólares al día si hace buen tiempo y 55 dólares si hace mal tiempo. Suponga que, un día cualquiera, el servicio meteorológico sugiere que hay un 40 por ciento de posibilidades de que haga un tiempo pésimo.

a) Construya el árbol de decisión de Joseph.
b) ¿Qué decisión recomienda con el criterio del valor esperado?

: P **A.18.** Kenneth Boyer está considerando abrir una tienda de bicicletas en el norte de Chicago. A Boyer le encanta montar en bicicleta, pero va a intentar hacer de esto un negocio del que pueda vivir. Puede abrir una tienda pequeña, una grande o no abrir ninguna. Como el arrendamiento del local donde piensa abrir la tienda será por un periodo de cinco años, necesita estar seguro de tomar la decisión correcta. Boyer también se está planteando contratar a su antiguo profesor de marketing para que realice un estudio de investigación de mercado para ver si existe mercado para sus servicios. El resultado de este estudio puede ser favorable o desfavorable. Desarrolle un árbol de decisión para Boyer.

⋮ **A.19.** Kenneth Boyer (del Problema A.18) ha realizado algunos análisis acerca de su decisión sobre la tienda de bicicletas. Si construye una tienda grande ganará 60.000 dólares si el mercado es favorable, pero perderá 40.000 dólares si el mercado es desfavorable. La tienda pequeña reportará 30.000 dólares de beneficio con un mercado favorable y una pérdida de 10.000 dólares si el mercado es desfavorable. Actualmente cree que en un 50 por ciento de los casos el mercado será favorable. Su antiguo profesor de marketing, Y. L. Yang, le cobrará 5.000 dólares por su investigación de mercado. Él ha estimado que existe una probabilidad de 0,6 de que el estudio de mercado sea favorable. Además hay una probabilidad de 0,9 de que el mercado sea favorable, si el estudio así lo dice. Sin embargo, Yang ha advertido a Boyer que si los resultados del estudio indican un mercado desfavorable, la probabilidad de que el mercado sea favorable es sólo de 0,12. Amplíe el árbol de decisión del Problema A.18 para ayudar a Boyer a decidir lo que debe hacer.

⋮ **A.20.** Dick Holliday no está seguro de lo que debería hacer. Se está planteando construir en su tienda una sección de alquiler de vídeos, pero no sabe si hacerla grande o pequeña. También puede reunir información adicional, o simplemente no hacer nada. Si reúne información adicional sobre el mercado, el resultado podría indicar un mercado favorable o desfavorable, pero le costaría 3.000 dólares reunir esa información. Holliday cree que hay una probabilidad del 50 por ciento de que la información sea favorable. Si el mercado de alquiler es favorable, Holliday ganará 15.000 dólares con la sección grande o 5.000 dólares con la pequeña. Sin embargo, con un mercado de alquiler de vídeos desfavorable, Holliday podría perder 20.000 dólares con la sección grande o 10.000 dólares con la pequeña. Sin conseguir información adicional, Holliday estima que la probabilidad de un mercado de alquiler favorable es de 0,70. Un informe favorable del estudio incrementaría la probabilidad de un mercado de alquiler favorable hasta 0,90. Además, un informe desfavorable de la información adicional disminuiría la probabilidad de un mercado favora-

ble de alquiler de vídeos hasta 0,40. Por supuesto, Holliday podría olvidarse de todos estos números y no hacer nada. ¿Cuál es su consejo para Holliday?

P **A.21.** El Problema A8 se ocupaba de la decisión del bufete Legal Services de Brookline. Utilizando los datos de dicho problema:

a) Desarrolle el árbol de decisión pertinente mostrando los resultados y las probabilidades.
b) La mejor alternativa utilizando el valor monetario esperado.

P **A.22.** La ciudad de Segovia está analizando la posibilidad de construir un segundo aeropuerto para aliviar la congestión del aeropuerto principal, y está analizando dos localizaciones potenciales, X e Y. Hard Rock Hotels querría comprar terrenos para construir un hotel en el nuevo aeropuerto. El valor de los terrenos ha estado aumentando en previsión de la decisión y se espera que se dispare cuando el ayuntamiento decida la ubicación definitiva. Por ello, Hard Rock quisiera comprar el terreno ahora. Hard Rock venderá el terreno si el ayuntamiento decide no ubicar ahí el aeropuerto. Hard Rock tiene cuatro opciones: (1) comprar terreno en X, (2) comprar terreno en Y, (3) comprar terreno tanto en X como en Y, o (4) no hacer nada. Hard Rock ha recopilado los siguientes datos (en millones de euros):

	Localización X	Localización Y
Precio de compra actual	27	15
Beneficios si se construyen aquí el aeropuerto y el hotel	45	30
Precio de venta si no se construye aquí el aeropuerto	9	6

Hard Rock estima que hay un 45 por ciento de posibilidades de que el aeropuerto se construya en X (de aquí que haya un 55 por ciento de posibilidades de que se construya en Y).

a) Desarrolle el árbol de decisión.
b) ¿Qué tiene que decidir Hard Rock para maximizar el beneficio neto total?

P **A.23.** Louisiana está diseñando nuevos juegos de lotería de "rascar y ganar". En el último juego, Bayou Boondoggle, el jugador tiene que rascar un punto de tres: A, B o C. A puede revelar "Perdedor", "Gana 1 dólar" o "Gana 50 dólares". B puede revelar "Perdedor" o "Tiene una segunda posibilidad". C puede revelar "Perdedor" o "Gana 500 dólares". En la segunda posibilidad se pide al jugador que rasque D o E. D puede revelar "Perdedor" o "Gana 1 dólar". E puede revelar "Perdedor" o "Gana 10 dólares". Las probabilidades de A son 0,9, 0,09 y 0,1. Las probabilidades de B son 0,8 y 0,2. Las probabilidades de C son 0,999 y 0,001. Las probabilidades de D son 0,5 y 0,5. Finalmente, las probabilidades de E son 0,95 y 0,05. Dibuje el árbol de decisión que representa este escenario. Utilice símbolos adecuados y etiquete todas las ramas con claridad. Calcule el valor esperado de este juego.



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: A.24 a A.31.

■ *Caso de estudio* ■

El trasplante de hígado de Tom Tucker

Tom Tucker, un hombre robusto de 50 años, es un ejecutivo que vive en los suburbios del norte de St. Paul, al que un médico de la Universidad de Minnesota le ha diagnosticado que tiene dañado el hígado. Aunque por lo demás está sano, su problema del hígado podría resultar fatal si se deja sin tratamiento.

Aún no dispone de los datos del informe para predecir la probabilidad de supervivencia, sin recurrir a la cirugía, para un hombre de la edad y condición de Tucker. Sin embargo, basándose en su propia experiencia y los recientes artículos publicados en revistas médicas, el médico le dice que si elige evitar el tratamiento quirúrgico del problema del hígado las posibilidades de supervivencia serán aproximadamente las siguientes: sólo un 60 por ciento de probabilidades de vivir 1 año, un 20 por ciento de probabilidades de sobrevivir 2 años, un 10 por ciento de sobrevivir 5 años y un 10 por ciento de alcanzar los 58 años. El médico considera extremadamente baja la probabilidad de sobrevivir por encima de los 58 años, si no se recurre a un trasplante de hígado.

Sin embargo, la operación de trasplante es un procedimiento quirúrgico delicado. El 5 por ciento de los pacientes muere durante la operación o durante su periodo de recuperación, con una mortalidad adicional del 45 por ciento durante el primer año. El 20 por ciento sobrevive 5 años, el 13 por ciento 10 años, y el 8, el 5 y el 4 por ciento sobreviven, respectivamente, 15, 20 y 25 años.

Cuestiones para desarrollar

1. ¿Cree que Tucker debería elegir la operación de trasplante?
2. ¿Qué otros factores debe tener en cuenta?

■ *Caso de estudio* ■

Ski Right Corporation

Tras jubilarse como médico, Bob Guthrie se convirtió en un ferviente esquiador en las nevadas montañas de Utah, en las Rocosas. Como inventor aficionado, Bob siempre estaba buscando algo nuevo. Con las recientes muertes de varios famosos esquiadores, Bob sabía que podría utilizar su mente creativa para que la actividad del esquí fuera más segura y su cuenta corriente más grande. Sabía que muchas muertes en las pistas de esquí se producen por lesiones en la cabeza. Aunque hace tiempo que existen en el mercado cascos protectores para esquiadores, la mayoría de los esquiadores los considera aburridos y antiestéticos. Como médico, Bob sabía que la respuesta era algún tipo de nuevo casco para esquiadores.

El mayor reto para Bob consistía en inventar un casco que fuera atractivo, seguro y divertido. Era imprescindible que tuviera muchos colores y que utilizara los últimos diseños de la moda. Tras años de esquiar, Bob sabía que muchos esquiadores creen que es más importante la apariencia que se tiene en las pistas que la calidad de la técnica de esquí. Sus cascos tendrán que dar una buena apariencia y ajustarse a las actuales tendencias de la moda. Pero no bastaba con tener cascos atractivos. Bob tenía que hacer que los cascos fueran divertidos y útiles. El nombre del nuevo casco de esquí, Ski Right, era indudablemente adecuado. Si Bob pudiese encontrar una buena idea, pensaba que había un 20 por ciento de posibilidades de que el mercado para el casco fuera excelente. Las posibilidades de un buen mercado deberían rondar el 40 por ciento. Bob también sabía que el mercado de este casco podría ser moderado (30 por ciento de posibilidades) o, incluso, malo (10 por ciento de posibilidades).

La idea de cómo lograr que los cascos fueran divertidos y útiles le vino a Bob cuando subía en una cabina a la cima de una montaña. Un ocupado ejecutivo en la cabina estaba hablando por su teléfono móvil intentando cerrar una compleja fusión. Cuando el ejecutivo

salió de la cabina, se le cayó el teléfono, que fue aplastado por el mecanismo de la cabina. Bob decidió que su nuevo casco de esquí tendría un teléfono móvil incorporado y una radio estéreo AM/FM. Todo se podría controlar desde un panel del control que se podría llevar en el brazo o en la pierna del esquiador.

Bob decidió poner en marcha un pequeño proyecto piloto para el Ski Right. Le gustaba estar jubilado y no quería que un fracaso le obligara a volver a trabajar. Tras ciertas investigaciones, Bob encontró a Progressive Products (PP). La empresa estaba dispuesta a ser socia en el desarrollo del Ski Right y compartir cualquier beneficio. Si el mercado fuese excelente, Bob ganaría 5.000 dólares netos al mes. Con un buen mercado, Bob ingresaría 2.000 netos. Un mercado medio daría lugar a una pérdida de 2.000 dólares y un mercado malo podría implicar que Bob perdiese 5.000 dólares al mes.

Otra opción para Bob consistía en permitir que Leadville Barts (LB) fabricase el casco. La empresa tenía amplia experiencia en fabricar cascos de bicicleta. Progressive tomaría entonces los cascos fabricados por Leadville Barts y haría el resto. Bob corría un riesgo mayor. Estimaba que podría perder 10.000 dólares al mes en un mercado malo o 4.000 en uno medio. Un mercado bueno daría 6.000 dólares de beneficios para Bob, y un mercado excelente implicaría unos beneficios netos mensuales de 12.000 dólares.

Una tercera opción consistía en recurrir a TalRad (TR), una empresa de radio de Tallase, Florida. TalRad tiene una amplia experiencia en fabricar radios militares. Leadville Barts podría fabricar los casos, y Progressive Products podría hacer el resto de producción y distribución. De nuevo, Bob estaría asumiendo un mayor riesgo. Un mercado malo podría implicar unas pérdidas mensuales de 15.000 dólares, y un mercado medio implicaría unas pérdidas de 10.000. Un mercado bueno daría lugar a un beneficio neto de 7.000 dólares para Bob. Un mercado excelente ofrecería 13.000 dólares al mes.

Bob también podría hacer que Celestial Cellular (CC) desarrollase los teléfonos. Así pues, otra opción sería que Celestial fabricase los teléfonos y Progressive el resto de la producción y la distribución. Puesto que el teléfono móvil era el componente más caro del casco, Bob podría perder 30.000 dólares al mes en un mercado malo. Podría perder 20.000 en un mercado medio. Si el mercado fuera bueno o excelente, Bob obtendría un beneficio neto de 10.000 o 30.000 dólares al mes, respectivamente.

La opción final de Bob consistía en olvidarse por completo de Progressive Products. Podría contratar a Leadville Barts para fabricar los cascos, a Celestial Cellular para hacer los teléfonos y a TalRad para hacer las radios AM/FM. Bob después contrataría a algunos amigos para ensamblarlo todo y comercializar los cascos Ski Right acabados. Con esta última alternativa, Bob podría obtener un beneficio neto de 55.000 dólares al mes en un mercado excelente. Incluso si el mercado sólo fuera bueno, Bob ingresaría 20.000 netos. Sin embargo, un mercado medio podría implicar una pérdida de 35.000 dólares. Si el mercado fuese malo Bob perdería 60.000 dólares al mes.

Preguntas para el debate

1. ¿Qué le recomendaría?
2. Calcule el valor esperado de la información perfecta.
3. ¿Ha sido Bob totalmente lógico en su forma de abordar el problema de decisión?

Fuente: B. Render, R. M. Stair y M. Hanna, *Quantitative Analysis for Management*, 9.ª edición, Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall (2006). Reproducido con autorización de Prentice Hall, Inc.

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Visite nuestra página personal www.prenhall.com/heizer para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Arctic, Inc.:** Una empresa de refrigeración tiene varias opciones respecto a capacidad y expansión.
- **Toledo Leather Company:** Esta empresa está intentando elegir nuevo equipo en función de los costes potenciales.



BIBLIOGRAFÍA

Brown, R. V. "The State of the Art of Decision Analysis". *Interfaces* 22, 6 (noviembre-diciembre 1992): pp. 5-14.

Collin, Ian. "Scale Management and Risk Assessment for Deepwater Developments". *World Oil* 224, n.º 5 (mayo 2003): p. 62.

Hammond, J. S., R. L. Kenney, y H. Raiffa. "The Hidden Traps in Decision Making". 76, n.º 5 *Harvard Business Review* (septiembre-octubre 1998): pp. 47-60.

Jbuedj, C. "Decision Making under Conditions of Uncertainty". *Journal of Financial Planning* (octubre 1997): p. 84.

Keefer, Donald L. "Balancing Drug Safety and Efficacy for a Go/No-Go Decision". *Interfaces* 34, n.º 2 (marzo-abril 2004): pp. 113-116.

Kirkwood, C. W. "An Overview of Methods for Applied Decision Analysis". *Interfaces* 22, 6 (noviembre-diciembre 1992): pp. 28-39.

Perdue, Robert K., William J. McAllister, Peter V. King, y Bruce G. Berkey. "Valuation of R and D Projects Using Options Pricing and Decision Analysis Models". *Interfaces* 29, 6 (noviembre 1999): pp. 57-74.

Raiffa, H. *Decision Analysis: Introductory Lectures on Choices Under Certainty*. Reading, MA: Addison-Wesley (1968).

Render, B., R. M. Stair, Jr., y R. Balakrishnan. *Managerial Decision Modeling with Spreadsheets*. 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Render, B., R. M. Stair Jr., y M. Hanna. *Quantitative Analysis for Management*, 9.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Schlaifer, R. *Analysis of Decisions Under Certainty*. New York: McGraw-Hill (1969).

MÓDULO CUANTITATIVO B

PROGRAMACIÓN LINEAL

CONTENIDO DEL MÓDULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando acabe este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Función objetivo
- Restricciones
- Región de factibilidad (de soluciones posibles)
- Métodos de solución a partir de rectas isobeneficio/isocoste
- Resolución a partir de los vértices
- Precio sombra

Describir o explicar:

- Cómo formular modelos lineales
- Métodos gráficos de programación lineal
- Cómo interpretar los análisis de sensibilidad

Numerosas decisiones de dirección de operaciones incluyen el intentar utilizar los recursos de una organización de la forma más eficaz posible. Normalmente, los recursos comprenden la maquinaria (como los aviones en el caso de las compañías aéreas), la mano de obra (los pilotos), dinero, tiempo y materias primas (como el combustible de los aviones). Estos recursos se pueden utilizar para producir productos (como máquinas, muebles, comida o ropa) o servicios (como horarios de vuelos, campañas de publicidad o decisiones de inversión). La **programación lineal** es una técnica matemática ampliamente utilizada y diseñada para ayudar a los directores de operaciones a planificar y a tomar las decisiones necesarias para asignar los recursos.

Programación lineal
Técnica matemática diseñada para ayudar a los directores de operaciones a planificar y tomar decisiones en relación con los equilibrios necesarios para asignar recursos.

A continuación presentamos algunos ejemplos de problemas donde se ha aplicado la programación lineal con éxito en la dirección de operaciones:

1. Programación de los autobuses escolares para *minimizar* la distancia total recorrida en el transporte de estudiantes.
2. Asignación de los coches patrulla de la policía a las zonas con un alto índice de criminalidad, con el fin de *minimizar* el tiempo de respuesta a las llamadas al teléfono de urgencias de la policía.
3. Programación de los cajeros en los bancos para que las necesidades estén cubiertas durante cada hora del día mientras se *minimiza* el coste total de la mano de obra.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

UTILIZACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL PARA SELECCIONAR A LOS ARRENDATARIOS DE UN CENTRO COMERCIAL

Homart Development Company es uno de los mayores promotores de centros comerciales en Estados Unidos. Cuando comienza con un nuevo centro, Homart realiza un plano de ocupación provisional (*footprint*) del centro. Este plano bosqueja las líneas maestras de tamaños, formas y espacios de las grandes tiendas. Se firman contratos de arrendamiento con dos o tres de las grandes cadenas de grandes almacenes que servirán de gancho para los clientes en el centro comercial. Estas tiendas que sirven de gancho tienen la posibilidad de negociar contratos de arrendamiento muy favorables, que generalmente se traducen en menores alquileres o en otras concesiones. Los beneficios de Homart provienen principalmente de los otros arrendatarios, tiendas pequeñas que alquilan espacios en las naves laterales del centro comercial. La decisión sobre la asignación de espacio a los arrendatarios potenciales es, por lo tanto, crucial para el éxito de la inversión.

La combinación de arrendatarios describe los tipos de tiendas deseadas en el centro comercial en cuanto a tama-

El frente de la tormenta se acercó rápidamente al aeropuerto de O'Hare (Chicago), paralizándolo sin previo aviso. La fuerte tormenta, los numerosos rayos y truenos y la escasa visibilidad hicieron salir disparados a los pasajeros y al personal de tierra de American Airlines. La razón de que American Airlines utilice la programación lineal (LP) para planificar horarios de vuelos, hoteles, tripulaciones y reabastecimientos, se halla en la LP tiene un impacto directo sobre la rentabilidad de la empresa. Como dice Thomas Cook, presidente del Grupo Tecnológico de Decisión de American Airlines, "Es esencial encontrar soluciones rápidas a los problemas con la programación lineal. Si tenemos graves trastornos meteorológicos en uno de nuestros centros importantes de conexión (hubs) como Dallas o Chicago, entonces tenemos que cancelar un gran número de vuelos, lo que significa tener un gran número de tripulaciones y aviones en lugares donde no deberían estar. Lo que necesitamos es poner todas las operaciónes de nuevo en marcha". La programación lineal es la herramienta que ayuda a las compañías aéreas, como American Airlines, a hacer frente y resolver estos problemas meteorológicos.

ño, ubicación general y tipo de mercancía o servicio suministrado. Por ejemplo, el mix puede especificar dos pequeñas joyerías en una sección central del centro comercial, y una zapatería de tamaño medio y un gran restaurante en uno de los pasillos laterales. Antes, Homart realizaba una planificación del mix de establecimientos a partir de reglas lógicas desarrolladas durante años de experiencia en la creación de centros comerciales.

Actualmente, para mejorar su balance final en un mercado cada vez más competitivo, Homart trata el problema del mix de establecimientos como un modelo de programación lineal. En primer lugar, el modelo parte de la hipótesis de que los arrendatarios pueden clasificarse en categorías, según el tipo de mercancía o servicio que proporcionan. Segundo, el modelo asume que, para cada tipo de tienda, los tamaños de éstas se pueden estimar según diferentes categorías. Por ejemplo, una joyería pequeña debe tener alrededor de 65 metros cuadrados, y una grande, aproximadamente unos 200 metros cuadrados. El modelo del mix de establecimientos es una poderosa herramienta para mejorar la planificación de centros comerciales y las actividades de arrendamiento de Homart.

Fuente: Chain Store Age (marzo de 2000): 191-192: *Business World* (18 de marzo de 2002): 1; e *Interfaces* (marzo-abril de 1988): 1-9.

4. Selección de la combinación (mix) de productos en una fábrica para conseguir la mejor utilización, tanto de las máquinas como de la mano de obra disponible, mientras se *maximizan* los beneficios de la empresa.
5. Elección de mezclas de materias primas en fábricas de alimentos, para obtener combinaciones de alimentos acabados al *mínimo* coste.
6. Determinar el sistema de distribución que *minimizará* el coste total de distribución desde diferentes almacenes hasta diversas localizaciones de consumo.
7. Desarrollo de un plan de producción que, satisfaciendo las demandas futuras paras los productos de una empresa, *minimice* al mismo tiempo los costes totales de producción e inventario.
8. Asignación del espacio para un conjunto de arrendatarios en un nuevo centro comercial con el fin de *maximizar* los ingresos de la empresa de leasing (*véase* el recuadro sobre *Dirección de producción en acción*, “Utilización de la programación lineal para seleccionar a los arrendatarios de un centro comercial”).

REQUISITOS DE UN PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN LINEAL

Todos los problemas de programación lineal tienen cuatro propiedades en común:

1. Los problemas de programación lineal buscan *maximizar* o *minimizar* alguna cantidad (normalmente beneficios o costes). Se denomina **función objetivo** (o función económica) de un problema de programación lineal. El objetivo prioritario de una empresa tipo es maximizar los beneficios a largo plazo. En el caso de sistemas de distribución terrestre o aérea, el objetivo puede ser *minimizar* los costes de envío.
2. La presencia de **restricciones** limita el nivel que podemos alcanzar en nuestro objetivo. Por ejemplo, la decisión sobre cuántas unidades se deben producir para una línea de productos de una empresa está condicionada por la disponibilidad de horas de mano de obra y maquinaria. Por lo tanto, queremos maximizar o minimizar una cantidad (la función objetivo) sujeta a las limitaciones de recursos existentes (restricciones).
3. Deben existir *diferentes alternativas de acción* donde poder elegir. Por ejemplo, si una empresa fabrica tres productos, los directivos pueden utilizar la programación

Función objetivo
Expresión matemática en un programa lineal que maximiza o minimiza alguna cantidad (a menudo beneficio o coste, pero puede utilizarse cualquier otro objetivo).

Restricciones
Restricciones que limitan el grado hasta el que un directivo puede perseguir un objetivo.

lineal para decidir cómo asignar entre ellos sus limitados recursos de producción (trabajo, máquinas y demás). Si no hubiera alternativas entre las cuales realizar la selección, no necesitaríamos la programación lineal.

4. La función objetivo y las restricciones de un problema de programación lineal deben expresarse por medio de *ecuaciones lineales* o desigualdades.

FORMULACIÓN DE PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN LINEAL

Una de las aplicaciones más comunes de la programación lineal es el *problema del plan de producción*. Dos o más productos se fabrican utilizando recursos limitados. La empresa desea determinar cuántas unidades de cada producto debe producir para maximizar el beneficio global dados sus limitados recursos. Veamos un ejemplo.

Ejemplo: Shader Electronics



Este ejemplo se ilustra con más detalle en el ejercicio Active Model B.1 del CD-ROM y en un ejercicio al final del capítulo.

Shader Electronics Company produce dos productos: (1) el Shader Walkman, un reproductor portátil de CD/DVD, y (2) el Shader Watch-TV, un televisor en color conectado a Internet del tamaño de un reloj de pulsera. El proceso de producción de cada producto es análogo, ya que ambos requieren cierto número de horas de trabajo en la sección de electrónica y unas determinadas horas de mano de obra en el departamento de montaje. Cada Walkman necesita 4 horas de trabajo en electrónica y 2 horas en el taller de montaje. Cada Watch-TV requiere 3 horas de trabajo en electrónica y una hora en montaje. Durante el actual periodo de producción se dispone de 240 horas de tiempo en electrónica y 100 horas en el departamento de montaje. Cada Walkman que se vende produce un beneficio de 7 dólares, mientras que por cada Watch-TV vendido se consiguen unos beneficios de 5 dólares.

El problema de Shader es determinar la mejor combinación posible a producir de Walkmans y de Watch-TV para alcanzar el máximo beneficio. Esta situación de determinar el mix de productos se puede formular como un problema de programación lineal.

Se debe empezar por resumir la información necesaria para formular y resolver este problema (*véase* la Tabla B.1). A continuación, introduzcamos una sencilla notación que utilizaremos en la función objetivo y en las restricciones. Sea:

Aquí denominamos X_1 y X_2 a las variables de decisión, pero señalemos que cualquier otra notación (como WM y WT) también sería válida.

X_1 = número de aparatos Walkman a producir
X_2 = número de aparatos Watch-TV a producir

Ahora se puede crear la *función objetivo* del programa lineal en términos de X_1 y X_2:

$$\text{Maximizar el beneficio} = 7X_1 \text{ (dólares)} + 5X_2 \text{ (dólares)}$$

TABLA B.1 ■ Datos del problema de Shader Electronics Company

	Horas necesarias para producir una unidad		
Departamento	Walkmans (X_1)	Watch-TV (X_2)	Horas disponibles esta semana
Electrónica	4	3	240
Montaje	2	1	100
Beneficio por unidad	7$	5$	

Nuestra siguiente etapa consiste en formular unas ecuaciones matemáticas que describan las dos restricciones de este problema. Una ecuación general es que la cantidad de un recurso utilizado sea menor o igual (≤) que la cantidad del recurso *disponible*.

Primera restricción: Tiempo utilizado en electrónica es ≤ Tiempo disponible en electrónica.

$$4X_1 + 3X_2 \leq 240 \text{ (horas de tiempo en electrónica)}$$

Segunda restricción: Tiempo de montaje utilizado es ≤ Tiempo de montaje disponible.

$$2X_1 + 1X_2 \leq 100 \text{ (horas de tiempo de montaje)}$$

Ambas restricciones representan limitaciones de la capacidad de producción y, por supuesto, afectan al beneficio total. Por ejemplo, Shader Electronics Company no puede producir 70 aparatos Walkman durante su periodo de producción, porque si $X_1 = 70$ se violarían ambas restricciones. Tampoco puede producir $X_1 = 50$ aparatos Walkman, y $X_2 = 10$ aparatos Watch-TV. Esta restricción saca a relucir otro aspecto importante de la programación lineal: existirá cierta interacción entre las variables. Cuantas más unidades de un producto fabrique una empresa, menos unidades puede producir de los otros productos.

RESOLUCIÓN GRÁFICA DE LOS PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN LINEAL

La forma más sencilla para resolver un pequeño problema de programación lineal como el de Shader Electronics Company es mediante un **enfoque de solución gráfica**. El procedimiento gráfico sólo se puede utilizar cuando existen dos **variables de decisión** (como el número de Walkmans a producir, X_1, y el número de Watch-TV a producir, X_2). Cuando hay más de dos variables, *no* es posible representar la solución en un gráfico bidimensional; entonces se debe recurrir a métodos más complejos, que se describirán más adelante en este módulo.

Método de resolución gráfica
Forma de representar gráficamente la solución a un problema con dos variables.

Variables de decisión
Son las elecciones disponibles para quien toma una decisión.

Representación gráfica de las restricciones

Para encontrar la solución óptima de un problema de programación lineal, en primer lugar se debe identificar el conjunto, o región, de soluciones posibles. La primera etapa para hacerlo consiste en dibujar las restricciones del problema en un gráfico.

La variable X_1 (en nuestro ejemplo, aparatos Walkman) se representa normalmente en el eje horizontal del gráfico, y la variable X_2 (aparatos Watch-TV) se representa en el eje vertical. El problema completo se puede replantear como:

$$\text{Maximizar el beneficio} = 7X_1\$ + 5X_2\$$$

Sujeto a las restricciones

$$4X_1 + 3X_2 \leq 240 \text{ (\textit{restricción del tiempo de trabajo disponible en electrónica})}$$
$$2X_1 + 1X_2 \leq 100 \text{ (\textit{restricción del tiempo de trabajo disponible en montaje})}$$
$$X_1 \geq 0 \text{ (el número de aparatos Walkman producidos es mayor o igual que 0)}$$
$$X_2 \geq 0 \text{ (el número de aparatos Watch-TV producidos es mayor o igual que 0)}$$

Estas dos restricciones también se denominan restricciones de no negatividad.

La primera etapa para la representación gráfica de las restricciones del problema es la conversión de las *desigualdades* en las que vienen expresadas las restricciones en *igualdades* (o ecuaciones).

$$\text{Restricción A:} \quad 4X_1 + 3X_2 = 240$$
$$\text{Restricción B:} \quad 2X_1 + 1X_2 = 100$$

En la Figura B.1 se representa la ecuación de la restricción A, y la de la restricción B en la Figura B.2.

Para dibujar la recta en la Figura B.1, lo único que hay que hacer es encontrar los puntos de intersección de la recta $4X_1 + 3X_2 = 240$ con los ejes X_1 y X_2. Cuando $X_1 = 0$ (punto de corte con el eje X_2), indica que $3X_2 = 240$ y que $X_2 = 80$. De la misma manera, cuando $X_2 = 0$, se verá que $4X_1 = 240$ y que $X_1 = 60$. Así, la restricción A está limitada por la recta que va desde ($X_1 = 0$, $X_2 = 80$) hasta ($X_1 = 60$, $X_2 = 0$). La región sombreada representa todos los puntos que satisfacen la *desigualdad* original.

La restricción B se representa de forma análoga en la Figura B.2. Cuando $X_1 = 0$, entonces $X_2 = 100$; y cuando $X_2 = 0$, entonces $X_1 = 50$. Así pues, la restricción B está limitada por la recta que va desde ($X_1 = 0$, $X_2 = 100$) hasta ($X_1 = 50$, $X_2 = 0$). El área sombreada representa la desigualdad original.

La Figura B.3 muestra las dos restricciones al mismo tiempo. La región sombreada es la zona que satisface las dos restricciones. El área sombreada en la Figura B.3 se conoce como *área de soluciones posibles*, o simplemente la **región factible**. Esta región debe satisfacer *todas* las condiciones especificadas por las restricciones del programa y es, en consecuencia, la región donde se solapan todas las restricciones. Cualquier punto que esté dentro de la región será una *solución posible* al problema de Shader Electronics Company. Cualquier punto que esté fuera del área sombreada representará una *solución no posible*. Por tanto, sería posible producir 30 Walkmans y 20 Watch-TV ($X_1 = 30$, $X_2 = 20$), pero una producción de 70 aparatos Walkman y 40 aparatos Watch-TV no satisfaría las restric-

Región de factibilidad
Conjunto de todas las combinaciones posibles de las variables de decisión.

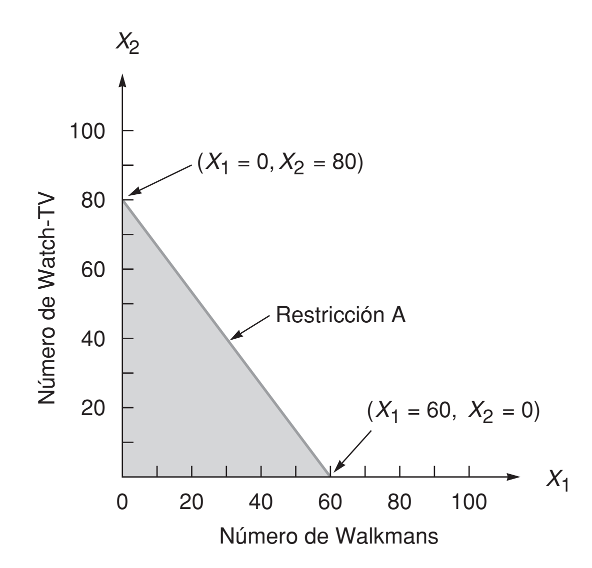


FIGURA B.1 ■ Restricción A

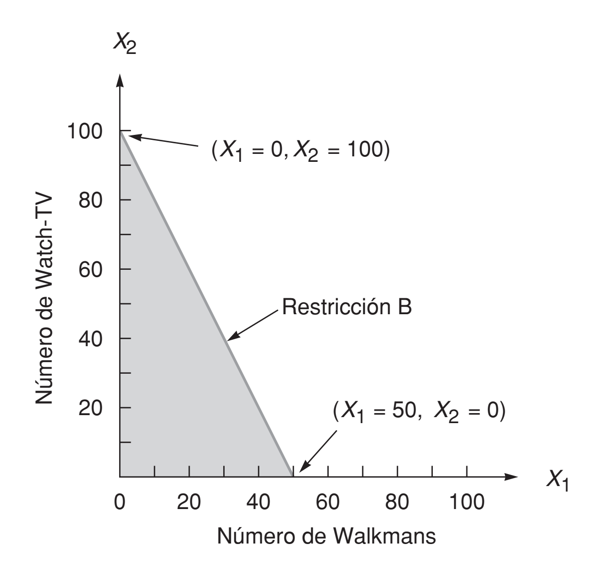


FIGURA B.2 ■ Restricción B

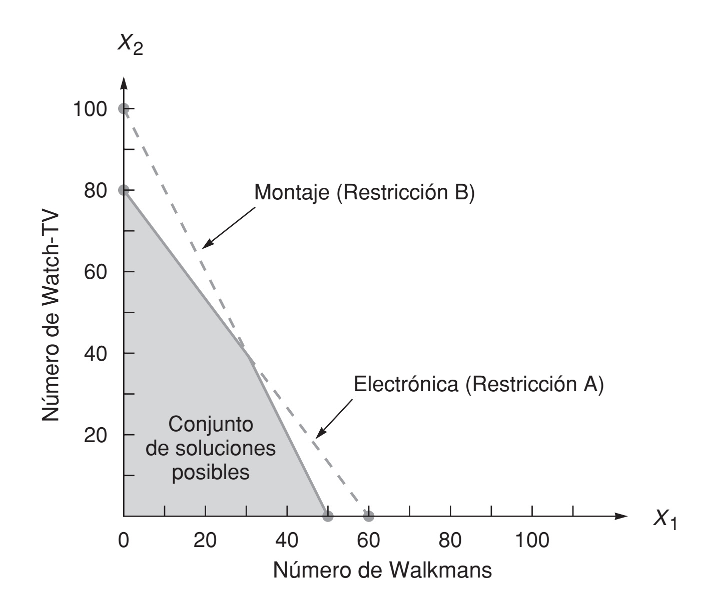


FIGURA B.3 ■ Región de soluciones posibles para el problema de Shader Electronics Company

ciones. Esto puede visualizarse al representar los puntos anteriores en el gráfico de la Figura B.3.

Método de solución a partir de las rectas isobeneficio

Una vez representado gráficamente el conjunto de soluciones posibles, podemos proceder a buscar la solución *óptima* del problema. La solución óptima será el punto del conjunto de soluciones posibles que produzca el máximo beneficio.

Una vez que se ha establecido la región de factibilidad, se pueden utilizar diferentes métodos para hallar la solución óptima. El método más rápido se denomina **método de la recta isobeneficio**[1].

Método de la recta isobeneficio
Un método para resolver gráficamente un problema de maximización de programación lineal.

Se empieza asignando a los beneficios una cantidad de dólares arbitraria pero pequeña. Para el problema de Shader Electronics Company, se puede elegir un beneficio de 210 dólares. Este nivel de beneficios se puede alcanzar fácilmente sin violar ninguna de las dos restricciones. La función objetivo se puede formular como $210\$ = 7X_1 + 5X_2$.

Esta expresión no es ni más ni menos que la ecuación de una recta, que se llamará *recta isobeneficio*. Esta recta representa todas las combinaciones (de X_1, X_2) que producirían un beneficio total de 210 dólares. Para representar la recta de beneficios, se procede exactamente igual que cuando se representó una restricción. En primer lugar, se toma $X_1 = 0$ y se busca el punto de intersección de la recta con el eje X_2:

$$210\$ = 7(0)\$ + 5X_2\$$$
$$X_2 = 42 \text{ aparatos Watch-TV}$$

Ahora se toma $X_2 = 0$ y se resuelve para buscar X_1:

$$210\$ = 7X_1\$ + 5(0)\$$$
$$X_1 = 30 \text{ aparatos Walkman}$$

[1] *Iso* significa "igual" o "similar". Así, una recta isobeneficio representa una recta en la que todos los puntos dan el mismo beneficio, en este caso 210 dólares.

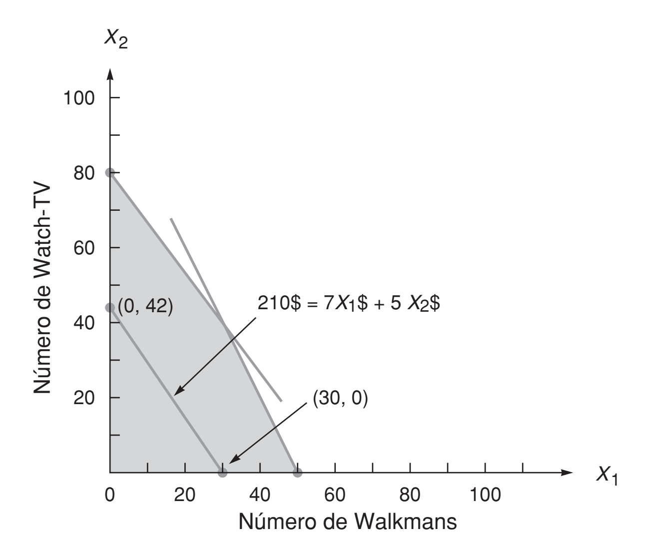


FIGURA B.4 ■ Recta de beneficio de 210 dólares obtenida para Shader Electronics Company

FIGURA B.5 ■ Cuatro rectas isobeneficio dibujadas para Shader Electronics Company

Ahora se pueden unir estos dos puntos mediante una línea recta. Esta recta de beneficio se muestra en la Figura B.4. Todos los puntos de esta recta representan soluciones posibles que proporcionan unos beneficios de 210 dólares.

Sin embargo, se puede ver que la recta isobeneficio de 210 dólares no proporciona el mayor beneficio posible para la empresa. En la Figura B.5 se intenta representar gráficamente dos rectas más, cada una de las cuales rinde un beneficio más alto. La ecuación intermedia, $280\$ = 7X_1\$ + 5X_2\$$, se dibujó de la misma manera que la recta inferior. Cuando $X_1 = 0$,

$$\begin{aligned} 280\$ &= 7(0)\$ + 5X_2\$ \\ X_2 &= 56 \text{ Watch-TV} \end{aligned}$$

Cuando $X_2 = 0$,

$$\begin{aligned} 280\$ &= 7X_1\$ + 5(0)\$ \\ X_1 &= 40 \text{ Walkmans} \end{aligned}$$

Una vez más, cualquier combinación de Walkmans (X_1) y Watch-TV (X_2) en esta recta isobeneficio producirá un beneficio total de 280 dólares.

Cabe resaltar que la tercera recta genera unos beneficios de 350 dólares, lo que supone una mejora sustancial. Cuanto más nos alejemos del origen 0, mayor será nuestro beneficio. Otro punto importante a destacar es que estas rectas isobeneficio son paralelas. Ahora tenemos dos pistas de cómo encontrar la solución óptima del problema original. Podemos dibujar un conjunto de rectas de beneficio paralelas (desplacemos cuidadosamente nuestra regla en un plano paralelo a la primera recta de beneficio). La recta de más alto beneficio que todavía tenga algún punto de contacto con la región de soluciones posibles señalará con precisión la solución óptima. Observemos que la cuarta línea (420 dólares) es demasiado elevada para poder tenerla en cuenta porque no toca la región de factibilidad.

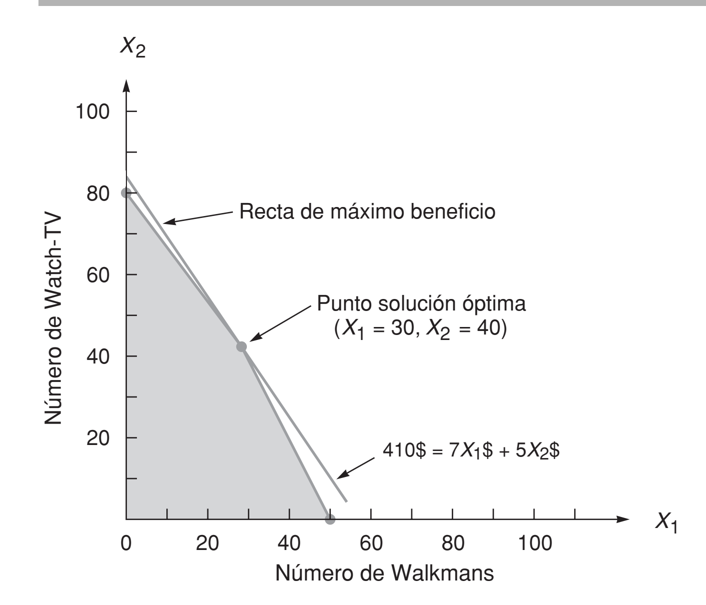


FIGURA B.6 ■ Solución óptima para el problema de Shader Electronics Company

La línea isobeneficio más alta posible se indica en la Figura B.6. Esta recta entra en contacto con el "extremo" del conjunto de soluciones posibles en el vértice ($X_1 = 30$, $X_2 = 40$) y proporciona un beneficio de 410 dólares.

Método de solución a partir de los vértices

Un segundo enfoque para resolver los problemas de programación lineal es utilizar el **método de los vértices** (o puntos extremos). Esta técnica es conceptualmente más simple que el método de las rectas isobeneficio, pero supone buscar el beneficio en cada uno de los vértices del conjunto de soluciones posibles.

Método de los vértices
Método para resolver gráficamente los problemas de programación lineal.

La teoría matemática que respalda la programación lineal afirma que una solución óptima a cualquier problema (esto es, los valores de X_1, X_2 que proporcionan el máximo beneficio) se encontrará en un *vértice*, o *punto extremo*, del conjunto de soluciones posibles. En consecuencia, es necesario encontrar sólo los valores de las variables en cada vértice; el máximo beneficio o solución óptima estará en uno (o más) de ellos.

Una vez más, se puede ver (en la Figura B.7) que la región de factibilidad para el problema de Shader Electronics Company es un polígono de cuatro lados con cuatro vértices o puntos extremos. Estos puntos se denominan en el gráfico ①, ②, ③ y ④. Para hallar los valores (X_1, X_2) que producen el máximo beneficio, calculamos cuáles son las coordenadas de cada vértice, y entonces se determinan y comparan sus niveles de beneficio.

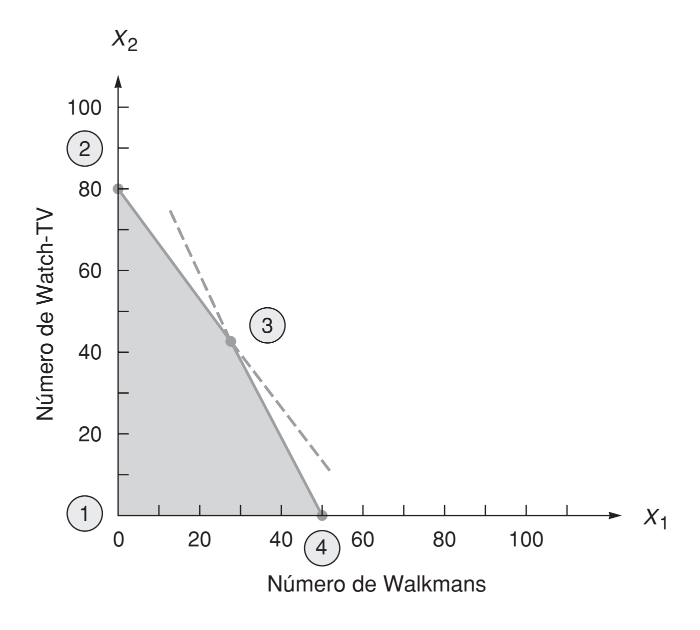
Punto ①: $(X_1 = 0, X_2 = 0)$ Beneficio 7(0)$ + 5(0)$ = 0$

Punto ②: $(X_1 = 0, X_2 = 80)$ Beneficio 7(0)$ + 5(80)$ = 400$

Punto ④: $(X_1 = 50, X_2 = 0)$ Beneficio 7(50)$ + 5(0)$ = 350$

Se pasó por alto momentáneamente el punto ③ ya que, para calcular sus coordenadas con *exactitud*, se necesita encontrar la intersección de las dos rectas de las restricciones. Como se recordará de álgebra, se puede aplicar el sistema de *ecuaciones simultáneas* a las dos ecuaciones de restricción:

FIGURA B.7 ■ Los cuatro vértices del conjunto de soluciones posibles



$$4X_1 + 3X_2 = 240 \qquad \text{(tiempo en electrónica)}$$
$$2X_1 + 1X_2 = 100 \qquad \text{(tiempo en montaje)}$$

Para resolver simultáneamente estas ecuaciones, se multiplica la segunda ecuación por −2:

$$-2(2X_1 + 1X_2 = 100) = -4X_1 - 2X_2 = -200$$

y se suma a la primera ecuación:

$$\begin{array}{rrl} +4X_1 & +3X_2 = & 240 \\ -4X_1 & -2X_2 = & -200 \\ \hline & +1X_2 = & 40 \end{array}$$

o bien

$$X_2 = 40$$

Al hacer esto se posibilita la eliminación de una variable, X_1, lo que permite encontrar el valor de X_2. Se puede ahora sustituir 40 por X_2 en cualquiera de las ecuaciones originales y obtener X_1. Se va a utilizar la primera ecuación. Entonces, cuando $X_2 = 40$,

$$4X_1 + 3(40) = 240$$
$$4X_1 + 120 = 240$$

o bien

$$4X_1 = 120$$
$$X_1 = 30$$

Así, el punto ③ tiene las coordenadas (X_1 = 30, X_2 = 40). Para completar el análisis se puede calcular su nivel de beneficios:

Aunque los valores de X_1 y X_2 son números enteros para el caso de Shader Electronics, no tiene por qué ser siempre así.

$$\text{Punto ③:} \quad (X_1 = 30, X_2 = 40) \quad \text{Beneficio} = 7(30)\$ + 5(40)\$ = 410\$$$

Puesto que el punto ③ proporciona el beneficio más alto entre todos los vértices, la solución óptima para el problema de Shader Electronics Company es el conjunto de productos formado por X_1 = 30 Walkmans y X_2 = 40 Watch-TV. Esta solución proporcionará un beneficio de 410 dólares para el periodo de producción; que es la misma solución que se obtuvo utilizando el método de la recta isobeneficio.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los directores de operaciones suelen estar interesados en algo más que la solución óptima de un problema de programación lineal. Además de conocer el valor de cada variable de decisión (las X_i), y el valor de la función objetivo, quieren saber hasta qué punto son sensibles estas respuestas a cambios de los **parámetros** de entrada. Por ejemplo, ¿qué pasaría si los coeficientes de la función objetivo no fueran exactos, o si cambiaran en un 10 o un 15 por ciento? ¿Qué pasaría si cambiaran los valores de la parte derecha de las restricciones (los términos independientes)? Debido a que las soluciones se basan en el supuesto de que los parámetros de entrada son constantes, empieza a cobrar importancia el análisis de sensibilidad. El **análisis de sensibilidad**, o análisis postóptimo, es el estudio del grado de sensibilidad de la solución a los cambios en los parámetros.

Parámetro
Valor numérico que está fijado en un modelo.

Análisis de sensibilidad
Análisis que estima cuánto puede cambiar una solución si hubiera cambios en las variables o en los datos de input.

Hay dos planteamientos para determinar la sensibilidad de la solución óptima a los cambios. El primero es simplemente un enfoque de prueba y error. Este planteamiento habitualmente requiere la resolución de todo el problema, preferiblemente con computadora, cada vez que cambia un elemento o parámetro. Puede ser necesario mucho tiempo para probar un conjunto de posibles cambios de esta manera.

El planteamiento que preferimos es el método analítico de postoptimalidad. Una vez resuelto un problema de programación lineal, definimos un intervalo de cambios en los parámetros del problema que no afectarán a la solución óptima ni cambiarán las variables presentes en la solución. Esto se hace sin tener que resolver el problema completo. El software de programación lineal, como el Solver de Excel o POM para Windows, tienen esta capacidad. A continuación se van a examinar varios escenarios referentes al ejemplo de Shader Electronics Company.

El Programa B.1 es parte del output generado por el Solver de Excel, disponible para ayudar a la persona que toma las decisiones a saber si una solución es relativamente insensible a cambios razonables en uno o más de los parámetros del problema. (La pasada completa en la computadora para estos datos, incluidos todos los inputs y outputs, se muestra en los Programas B.2 y B.3, que se presentan más adelante en este módulo).

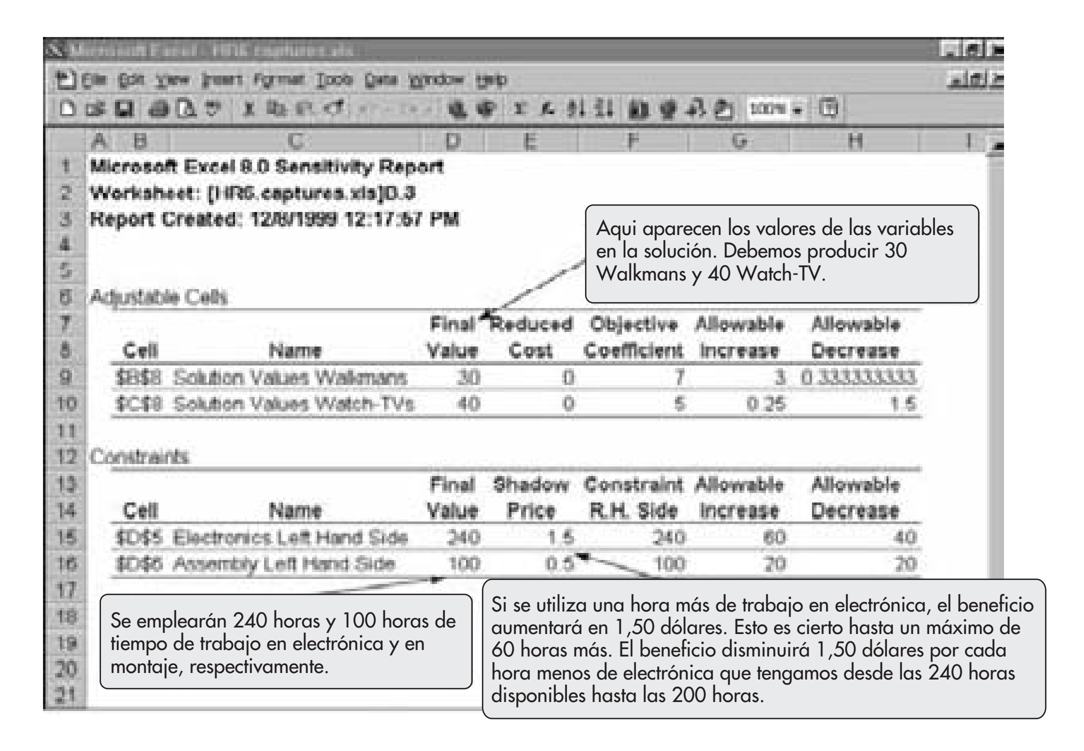
Informe de sensibilidad

El ***informe de sensibilidad*** de Excel para el ejemplo de Shader Electronics en el Programa B1 tiene dos elementos bien diferenciados: (1) una tabla denominada Celdas Ajustables y (2) una tabla denominada Restricciones. Estas tablas nos permiten responder a diferentes preguntas, del tipo "¿qué pasaría si...?", sobre la solución del problema.

El ***informe de sensibilidad*** tiene dos partes: celdas ajustables y restricciones.

Sólo estamos analizando un cambio cada vez.

Es importante señalar que, cuando se utiliza la información del informe de sensibilidad para responder a preguntas del tipo "¿qué pasaría si...?", suponemos que estamos



Microsoft Excel 8.0 Sensitivity Report
Worksheet: [HR6.captures.xls]D.3
Report Created: 12/8/1999 12:17:57 PM

Adjustable Cells

Cell	Name	Final Value	Reduced Cost	Objective Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
$B$8	Solution Values Walkmans	30	0	7	3	0.333333333
$C$8	Solution Values Watch-TVs	40	0	5	0.25	1.5

Constraints

Cell	Name	Final Value	Shadow Price	Constraint R.H. Side	Allowable Increase	Allowable Decrease
$D$5	Electronics Left Hand Side	240	1.5	240	60	40
$D$6	Assembly Left Hand Side	100	0.5	100	20	20

PROGRAMA B.1 ■ Análisis de sensibilidad para Shader Electronics Company, resuelto con la utilización del Solver de Excel

teniendo en cuenta un cambio de *sólo* un valor de los datos de entrada. Es decir, la información de sensibilidad no se puede aplicar siempre a cambios simultáneos en los valores de diversos datos de entrada.

La tabla de las ***Celdas Ajustables*** presenta información relativa al impacto de los cambios en los coeficientes de la función objetivo (es decir, los beneficios unitarios de 7 y 5 dólares) sobre la solución óptima. La tabla de ***Restricciones*** presenta información relacionada con el impacto de los cambios en los valores de los términos independientes de las restricciones (es decir, las 240 horas y las 100 horas) en la solución óptima. Aunque los diferentes paquetes de software LP pueden formatear y presentar estas tablas de distinta manera, todos los programas ofrecen, en esencia, la misma información.

Cambios en los recursos o en los valores de los términos independientes

Los valores del lado derecho de las restricciones o términos independientes suelen representar los recursos de que dispone la empresa. Los recursos pueden ser horas de trabajo de la mano de obra u horas de máquina, o tal vez dinero o materiales de producción disponibles. En el ejemplo de Shader Electronics los dos recursos son horas disponibles de tiempo de electrónica y horas de tiempo de montaje. Si hubiera más horas disponibles se podría obtener un mayor beneficio total. ¿Cuánto tendría que estar dispuesta la empresa a pagar para obtener horas adicionales? ¿Es rentable tener más horas de electrónica? ¿Deberíamos estar dispuestos a pagar para tener más tiempo de montaje? El análisis de sensibilidad sobre estos recursos nos ayudará a responder a estas preguntas.

Si cambia el término independiente de una restricción cambiará la región de factibilidad (salvo que la restricción sea redundante) y, a menudo, cambiará la solución óptima. En el ejemplo de Shader había 100 horas de tiempo de ensamblaje disponible cada semana, y el máximo beneficio posible era de 410 dólares. Si el número de horas de ensamblaje disponibles se *incrementa* hasta 110, la nueva solución óptima, como se puede ver en la Figura B.8(a), es (45, 20) y el beneficio es de 415 dólares. Así pues, las 10 horas adicionales dan lugar a un aumento de beneficio de 5 dólares, o 0,5 dólares por hora. Si se *reduce* el número de horas a 90, como se muestra en la Figura B.8(b), la nueva solución óptima es (15, 60) y el beneficio es de 405 dólares. En consecuencia, la reducción de 10 horas da lugar a una disminución del beneficio de 5 dólares, o 0,5 dólares por hora. Este cambio de 0,5 dólares por hora en el beneficio que resulta de una variación de las horas disponibles de ensamblaje, se denomina precio sombra o valor **dual**. El **precio sombra** de una restricción es la mejora en el valor de la función objetivo que resulta de un aumento unitario en el valor del término independiente (lado derecho) de la restricción.

Si el tamaño de la región de factibilidad aumenta, el valor óptimo de la función objetivo podría mejorar.

Precio sombra (o dual) Valor de una unidad adicional de un recurso escaso en la programación lineal.

Intervalo de validez del precio sombra Puesto que el beneficio de Shader Electronics aumenta en 0,5 dólares por cada hora adicional de tiempo de ensamblaje, ¿significa esto que Shader puede hacerlo indefinidamente, de modo que logra un beneficio infinito? Evidentemente, sería ilógico. ¿Hasta dónde puede Shader aumentar su disponibilidad de tiempo de ensamblaje y seguir ganando un beneficio adicional de 0,5 dólares por hora? Es decir, ¿hasta qué nivel de aumento del valor del término independiente de la restricción de tiempo de ensamblaje sigue siendo válido el precio sombra de 0,5 dólares?

El precio sombra de 0,5 dólares sigue siendo válido siempre que el tiempo de ensamblaje disponible esté en un intervalo dentro del cual continúen existiendo los vértices actuales. La información para calcular los límites superior e inferior de este intervalo viene dada por las entradas denominadas Aumento Permisible y Disminución Permisible en

El precio sombra sólo es válido mientras los cambios en los términos independientes (lado derecho de la restricción) se mantengan entre los valores de Aumento Permisible y Disminución Permisible.

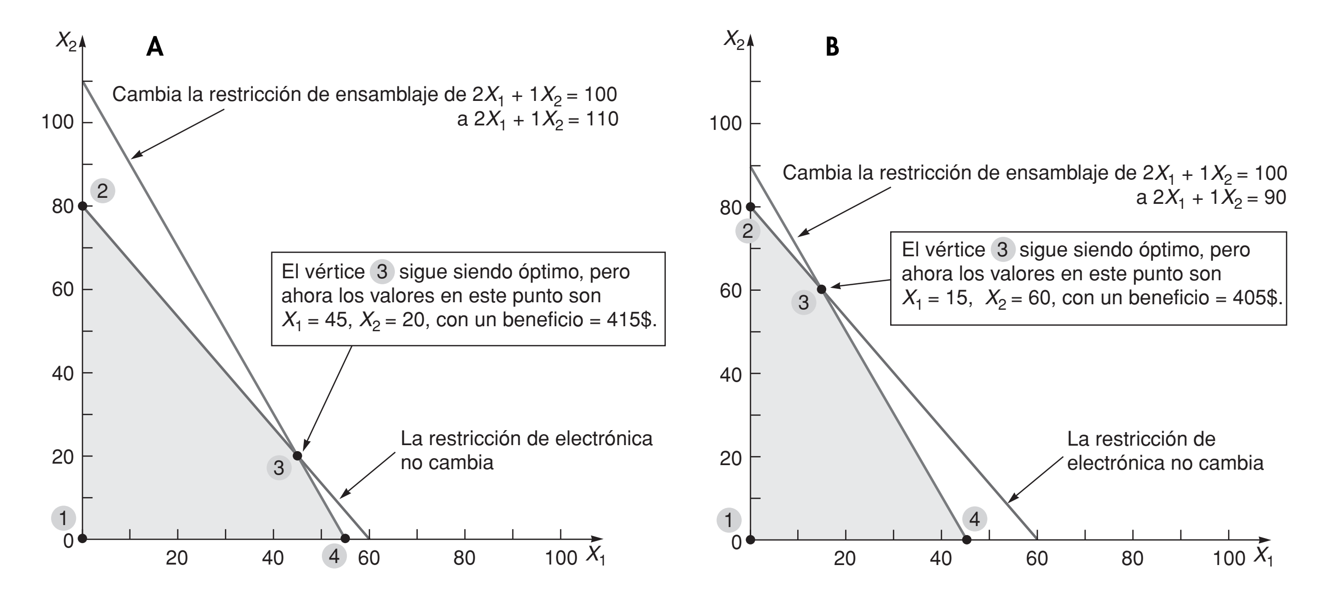


FIGURA B.8 ■ Análisis de sensibilidad sobre los recursos en el caso de Shader Electronics

el *informe de sensibilidad* del Programa B.1. En el caso de Shader, estos valores muestran que el precio sombra de 0,5 dólares para el tiempo de ensamblaje disponible es válido para un aumento de hasta 20 horas respecto al valor actual y para una reducción de hasta 20 horas. Es decir, la disponibilidad de tiempo de ensamblaje puede ir desde un mínimo de 80 (= 100 − 20) hasta un máximo de 120 (= 100 + 20) para que el precio sombra de 0,5 dólares siga siendo válido. Observe que la reducción permisible implica que, por cada hora que pierde Shader de tiempo de ensamblaje (hasta 20 horas), su beneficio se reduce en 0,5 dólares.

Cambios en los coeficientes de la función objetivo

Vamos a centrarnos ahora en la información proporcionada por el Programa B.1 denominada ***Celdas Ajustables.*** Cada fila de la tabla de ***Celdas Ajustables*** contiene información sobre una variable de decisión (es decir, Walkmans o Watch-TV) en el modelo de programación lineal.

Intervalos permisibles para los coeficientes de la función objetivo A medida que cambia la contribución de beneficio unitario de cualquiera de los productos, cambia la pendiente de las rectas isobeneficio que vimos anteriormente en la Figura B.5. Sin embargo, la región de factibilidad sigue siendo la misma. Es decir, la ubicación de los vértices no cambia.

Para cada coeficiente de la función objetivo, hay un aumento y disminución permisible para los cuales la solución actual óptima sigue siendo óptima.

Un nuevo vértice se convertirá en óptimo si un coeficiente de la función objetivo disminuye o aumenta demasiado.

Los límites de la variación de los coeficientes de beneficio de los Walkmans o de los Watch-TV, sin afectar a la optimalidad de la solución actual, están indicados por los valores de las columnas de ***Aumento Permisible*** y ***Disminución Permisible*** en el ***Informe de sensibilidad*** del Programa B.1. El incremento permisible en el coeficiente de la función objetivo para los Watch-TV es sólo de 0,25 dólares. En cambio, la disminución permisible es de 1,50 dólares. Por consiguiente, si el beneficio unitario de los Watch-TV cae hasta 4 dólares (es decir, una reducción de un dólar respecto al valor actual de 5 dólares), sigue siendo óptimo producir 30 Walkmans y 40 Watch-TV. El beneficio total disminuirá hasta 370 dólares (desde 410 dólares), porque cada Watch-TV genera ahora un menor beneficio (de un dólar por unidad). Sin embargo, si el beneficio unitario cae por debajo de 3,5 dólares por Watch-TV (es decir, una disminución superior a 1,5 dólares respecto al beneficio actual de 5 dólares), la solución actual deja de ser óptima. El problema de programación lineal tendrá que resolverse utilizando *Solver* de *Excel*, u otro programa informático, para calcular el nuevo vértice óptimo.

RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE MINIMIZACIÓN

Muchos problemas de programación lineal tratan de *minimizar* un objetivo, como un coste, en lugar de maximizar una función de beneficio. Por ejemplo, un restaurante puede desear desarrollar unos horarios de trabajo que satisfagan las necesidades de personal, al mismo tiempo que minimiza el número total de empleados. También, un fabricante puede buscar la distribución de sus productos desde varias fábricas hasta sus numerosos almacenes de tal forma que minimice los costes totales de transporte.

Método de la recta isocoste
Método para resolver gráficamente un problema de minimización de programación lineal.

Los problemas de minimización se pueden resolver gráficamente determinando primero el conjunto de soluciones posibles, y utilizando, o bien el método de los vértices, o bien el método de la **recta isocoste** (que es análogo al método de la recta isobeneficio en los problemas de maximización) para encontrar los valores de X_1 y X_2 que proporcionen el coste mínimo.

El Ejemplo B1 muestra cómo resolver un problema de minimización.

EJEMPLO B1

Un problema de minimización con dos variables

Cohen Chemicals, Inc., produce dos tipos de líquidos de revelado de fotografía. El primero, un reactivo químico para revelar fotografías en blanco y negro, cuya producción cuesta a Cohen 2.500 dólares por tonelada. El segundo, un reactivo químico para revelar fotografías en color, que cuesta 3.000 dólares por tonelada.

A partir del análisis de los actuales niveles del inventario y de los pedidos pendientes, el director de producción de Cohen ha estimado que se deben producir, durante el próximo mes, al menos 30 toneladas de reactivo para blanco y negro y al menos 20 toneladas de reactivo para color. Además, el director se ha dado cuenta de que un stock existente de una materia prima altamente perecedera, necesaria para producir ambos reactivos químicos, debe usarse en un periodo de 30 días. Para no desperdiciar esta costosa materia prima, Cohen debe producir en el próximo mes un total de, al menos, 60 toneladas de los reactivos químicos para el revelado de fotografías.

Se puede formular esta información como un problema de minimización de programación lineal. Sea:

X_1 = número de toneladas producidas del reactivo para blanco y negro
X_2 = número de toneladas producidas del reactivo para color

Sujeto a:

$X_1 \geq$ 30 toneladas de reactivo químico para blanco y negro
$X_2 \geq$ 20 toneladas de reactivo químico para color
$X_1 + X_2 \geq$ 60 toneladas totales
$X_1, X_2 \geq$ 0 requisitos de no negatividad

Para resolver gráficamente el problema de Cohen Chemicals, se construye la región factible del problema, tal y como se muestra en la Figura B.9.

En los problemas de minimización es muy normal encontrarse con conjuntos abiertos de soluciones posibles (al no estar limitados hacia arriba ni a la derecha); pero esta característica no impide su resolución. Mientras estén limitados hacia el interior (en la parte izquierda y en la parte inferior), se pueden establecer vértices. La solución óptima estará en uno de esos vértices.

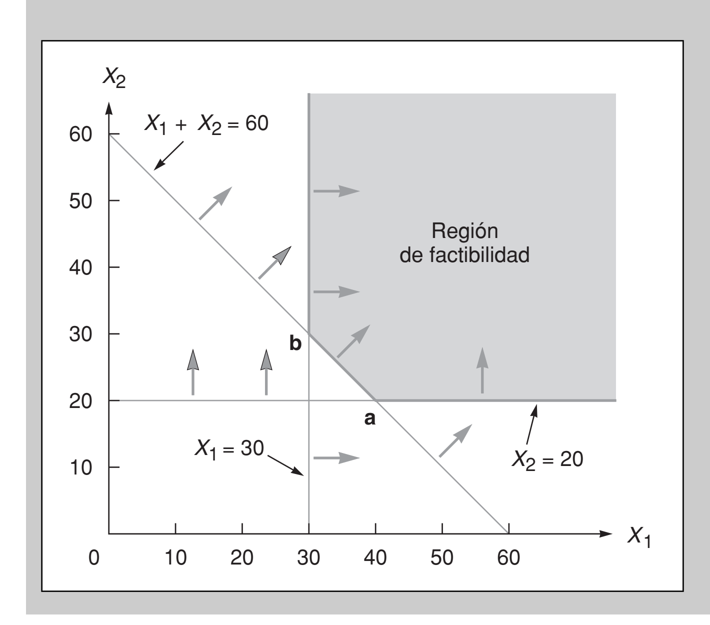


FIGURA B.9 ■ Región de soluciones posibles del problema Cohen Chemical

En un problema de minimización el área no está acotada por la parte derecha, al contrario de lo que sucede en un problema de maximización.

En el caso de la Figura B.9, hay sólo dos vértices, **a** y **b**. Es fácil determinar que en el punto **a**, $X_1 = 40$ y $X_2 = 20$, y que en el punto **b**, $X_1 = 30$ y $X_2 = 30$. La solución óptima se halla en el punto que proporciona el menor coste.

Así pues:

$$\begin{aligned} \text{El coste total en } \mathbf{a} &= 2.500X_1 + 3.000X_2 \\ &= 2.500(40) + 3.000(20) \\ &= 160.000 \text{ dólares} \\ \text{El coste total en } \mathbf{b} &= 2.500X_1 + 3.000X_2 \\ &= 2.500(30) + 3.000(30) \\ &= 165.000 \text{ dólares} \end{aligned}$$

El menor coste para Cohen Chemicals se encuentra en el punto **a**. Por lo tanto, el director de operaciones debería producir 40 toneladas de reactivo químico revelador de blanco y negro y 20 toneladas de reactivo químico revelador de color.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

PROGRAMACIÓN DE AVIONES EN DELTA AIRLINES UTILIZANDO LA PROGRAMACIÓN LINEAL

Se ha dicho que un asiento en una compañía aérea es el producto más perecedero del mundo. Cada vez que un avión de una compañía aérea despega con un asiento vacío, se ha perdido para siempre una oportunidad de obtener ingresos. Para Delta Airlines, que realiza más de 2.500 rutas nacionales al día, utilizando cerca de 450 aviones de 10 modelos diferentes, su programación es vital para el buen funcionamiento de la compañía aérea.

Una ruta de Delta puede consistir en un reactor Boeing 757 asignado al vuelo que partiendo de Atlanta a las 6:21 horas llega a Boston a las 8:45 horas. El problema de Delta, como el de sus competidores, es el de asignar sus aviones, como pueden ser los 747, los 757 o los 767, a las rutas a realizar, como puede ser Atlanta-Boston, y ocupar sus asientos con pasajeros que hayan pagado su billete. Los recientes avances, tanto de los algoritmos de programación lineal como de las herramientas informáticas, han hecho posible por primera vez la resolución de problemas de optimización de este alcance. Delta denomina a su enorme modelo de programación lineal "Coldstart" y utiliza el modelo cada día. Delta es la primera compañía aérea que resuelve un problema de este tipo.

El tamaño habitual de un modelo Coldstart consta de unas 40.000 restricciones y 60.000 variables. Entre las restricciones están la disponibilidad de aviones, el equilibrar las llegadas y salidas en los aeropuertos, las necesidades de mantenimiento de los aviones, etc. El objetivo de Coldstart es minimizar una combinación de los costes de operación y de los ingresos perdidos de pasajeros, que se denomina "costes de desbordamiento" (*spill costs*).

Los ahorros conseguidos hasta la fecha con el modelo han sido enormes, y se han estimado en 220.000 dólares por día con respecto a la antigua herramienta de planificación, que se denominaba "Warmstart". Delta ahorra 300 millones de dólares por año con la utilización de la programación lineal.

Fuentes: Interfaces (septiembre-octubre de 1999): 123-131; *Interfaces* (enero-febrero de 1994): 104-120; y *OR/MS Today* (agosto de 1995): 14-15.

APLICACIONES DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL

Cada uno de los ejemplos precedentes incluye sólo dos variables (X_1 y X_2). Sin embargo, la mayoría de los problemas del mundo real contienen muchas más variables. Utilicemos los principios ya desarrollados para formular unos cuantos ejemplos más complejos. La

práctica que usted conseguirá al "parafrasear" las siguientes situaciones de programación lineal deberá ayudarle a desarrollar sus habilidades para aplicar la programación lineal a otras situaciones corrientes en operaciones.

Ejemplo del mix de producción

El Ejemplo B2 trata sobre otra decisión de *mix de producción*. Hay que distribuir escasos recursos entre diferentes productos que produce una empresa. El objetivo global de la empresa es la fabricación de los productos seleccionados en las cantidades adecuadas para conseguir maximizar los beneficios totales.

EJEMPLO B2

Un problema sobre el mix de producción

Failsafe Electronics Corporation fabrica principalmente cuatro productos de alta tecnología, con los que abastece a empresas aeroespaciales que tienen contratos con la NASA. Cada uno de estos productos debe pasar, antes de ser transportado, por los siguientes departamentos: cableado, perforación, montaje e inspección. En la tabla siguiente se resume, para cada unidad producida, los tiempo requeridos en cada departamento (en horas) y su correspondiente beneficio:

	Departamento				
Producto	**Cableado**	**Perforación**	**Montaje**	**Inspección**	**Beneficio por unidad**
XJ201	0,5	3	2	0,5	9$
XM897	1,5	1	4	1,0	12$
TR29	1,5	2	1	0,5	15$
BR788	1,0	3	2	0,5	11$

El tiempo de producción disponible cada mes en cada departamento y la producción mensual mínima necesaria para cumplir con los contratos se especifican a continuación:

Departamento	Capacidad (en horas)	Producto	Nivel mínimo de producción
Cableado	1.500	XJ201	150
Perforación	1.700	XM897	100
Montaje	2.600	TR29	300
Inspección	1.200	BR788	400

El director de producción tiene la responsabilidad de definir los niveles de producción de cada producto para el próximo mes. Sea:

X_1 = número de unidades XJ201 producidas
X_2 = número de unidades XM897 producidas
X_3 = número de unidades TR29 producidas
X_4 = número de unidades BR788 producidas

Maximización del beneficio $= 9X_1 + 12X_2 + 15X_3 + 11X_4$

sujeto a $0{,}5X_1 + 1{,}5X_2 + 1{,}5X_3 + 1X_4 \leq 1.500$ horas disponibles de cableado

$3X_1 + 1X_2 + 2X_3 + 3X_4 \leq 2.350$ horas disponibles de perforación

$$
\begin{aligned}
2X_1 + 4X_2 + 1X_3 + 2X_4 &\leq 2.600 \text{ horas disponibles de montaje}\\
0{,}5X_1 + 1X_2 + 0{,}5X_3 + 0{,}5X_4 &\leq 1.200 \text{ horas de inspección}\\
X_1 &\geq 150 \text{ unidades de XJ201}\\
X_2 &\geq 100 \text{ unidades de XM897}\\
X_3 &\geq 300 \text{ unidades de TR29}\\
X_4 &\geq 400 \text{ unidades de BR788}\\
X_1, X_2, X_3, X_4 &\geq 0
\end{aligned}
$$

Ejemplo del problema de la dieta

El Ejemplo B3 presenta el *problema de la dieta*, que originalmente fue utilizado por los hospitales para determinar la dieta más económica para los pacientes. Conocido en aplicaciones agrícolas como el *problema del mix de alimentos*, el problema de la dieta implica especificar una comida o una combinación de ingredientes alimentarios que satisfagan los requisitos nutritivos establecidos a un coste mínimo.

EJEMPLO B3

Un problema de la dieta

La empresa Feed'N Ship tiene unas instalaciones en las que se encarga de engordar ganado para los granjeros locales y, una vez cebado, el ganado se transporta a los mercados de carne de Kansas City y Omaha. Los dueños de las instalaciones de cebado quieren determinar la cantidad de diferentes piensos para ganado que deben comprar, para satisfacer los mínimos estándares nutritivos y, al mismo tiempo, minimizar los costes totales de piensos.

Cada pienso contiene distintas cantidades de cuatro ingredientes nutricionales: A, B, C y D. A continuación se muestran los contenidos de estos ingredientes en cada pienso, en *onzas por libra de pienso:*

	Pienso		
Ingrediente	**Pienso X**	**Pienso Y**	**Pienso Z**
A	3 onzas	2 onzas	4 onzas
B	2 onzas	3 onzas	1 onzas
C	1 onzas	0 onzas	2 onzas
D	6 onzas	8 onzas	4 onzas

El coste por libra de los piensos X, Y y Z es de 0,02 dólares, 0,04 dólares y 0,025 dólares, respectivamente. La necesidad mínima de cada ingrediente por vaca y por mes es de 64 onzas del ingrediente A, 80 onzas del ingrediente B, 16 onzas del ingrediente C y 128 onzas del ingrediente D.

La empresa de engorde se enfrenta a una restricción adicional: a pesar de su necesidad, sólo puede obtener de los suministradores de piensos 500 libras del pienso Z por mes. Dado que Feed'N Ship tiene normalmente, en cualquier momento, 100 vacas en sus instalaciones de engorde, esta restricción limita la cantidad de pienso Z en la alimentación de cada vaca a no más de 5 libras, u 80 onzas, por mes. Sea:

X_1 = número de libras de pienso X compradas por vaca cada mes

X_2 = número de libras de pienso Y compradas por vaca cada mes
X_3 = número de libras de pienso Z compradas por vaca cada mes

Mínimizar coste = $0{,}02X_1 + 0{,}04X_2 + 0{,}025X_3$ sujeto a

Necesidad de ingrediente A:	$3X_1 + 2X_2 + 4X_3 \geq 64$
Necesidad de ingrediente B:	$2X_1 + 3X_2 + 1X_3 \geq 80$
Necesidad de ingrediente C:	$1X_1 + 0X_2 + 2X_3 \geq 16$
Necesidad de ingrediente D:	$6X_1 + 8X_2 + 4X_3 \geq 128$
Limitación del pienso Z:	$X_3 \leq 80$
	$X_1, X_2, X_3 \geq 0$

La solución más económica consiste en comprar 40 libras del pienso X_1, a un coste de 0,8 dólares por vaca.

Ejemplo de programación de la producción

Una de las áreas más importantes de aplicación de la programación lineal es la *planificación de la producción*. La resolución de un problema de planificación de la producción permite al director de producción establecer un plan de producción eficiente y de bajo coste para un producto durante varios periodos de producción. Básicamente, el problema se asemeja al modelo del mix de producción para cada periodo en el futuro. Los niveles de producción deben permitir a la empresa satisfacer la demanda para sus productos dentro de las restricciones existentes de mano de obra e inventario. El objetivo es, o maximizar los beneficios, o minimizar los costes totales (de producción más inventario).

EJEMPLO B4

Un problema de planificación de la producción

La empresa T. E. Callarman Appliance Company está pensando en producir y vender compactadores de basura de forma experimental durante los próximos seis meses. Se prevé que los costes de fabricación y los precios de venta de los compactadores variarán cada mes. La Tabla B.2 recoge estas previsiones de gastos y de precios.

TABLA B.2 ■ Costes de fabricación y precios de venta

Mes	Costes de fabricación	Precio de venta (durante el mes)
Julio	60$	—
Agosto	60$	80$
Septiembre	50$	60$
Octubre	60$	70$
Noviembre	70$	80$
Diciembre	—	90$

Todos los compactadores fabricados durante cualquier mes se envían en un gran envío al final de ese mes al almacén, y desde allí se venden a partir del mes siguiente. La empresa puede ven-

der hasta 300 unidades por mes, pero su operación está limitada por el tamaño de su almacén, que puede contener un máximo de 100 compactadores.

El director de operaciones de Callarman, Richard Deckro, tiene que determinar el número de compactadores que hay que producir y vender cada mes con el fin de maximizar el beneficio de la empresa. Callarman no tiene compactadores disponibles en stock al inicio del mes de julio y desea no tener compactadores en stock al final del periodo experimental, en diciembre.

Para formular este problema de programación lineal, Deckro tiene

$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ = número de unidades *fabricadas* durante julio (primer mes), agosto (segundo mes), etc.

$Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6$ = número de unidades *vendidas* durante julio, agosto, etc.

Deckro es consciente de que, puesto que la empresa empieza sin compactadores (y dado que se tarda un mes en producir y enviar el primer lote), no se puede vender ninguna unidad en julio (esto es, $Y_1 = 0$). Además, puesto que quiere tener cero unidades en inventario al final del año, la fabricación durante el mes de diciembre debe ser nula (es decir, $X_6 = 0$).

Los beneficios de Callarman Appliance son las ventas menos los costes de fabricación. Por tanto, la función objetivo de Deckro es

$$\text{Maximizar el beneficio} = 80Y_2 + 60Y_3 + 70Y_4 + 80Y_5 + 90Y_6 - (60X_1 + 60X_2 + 50X_3 + 60X_4 + 70X_5)$$

La primera parte de esta expresión es el precio de venta multiplicado por las unidades vendidas cada mes. La segunda parte está dada por el coste de fabricación, concretamente, los costes de la Tabla B.2 por las unidades fabricadas.

Para establecer las restricciones, Deckro necesita introducir un nuevo conjunto de variables: $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$. Éstas representan el inventario al final de cada mes (después de que se hayan realizado todas las ventas y después de que la cantidad producida durante el mes se haya colocado en el almacén). Así,

$$\begin{matrix}\text{Inventario} \\ \text{al final de} \\ \text{este mes}\end{matrix} = \begin{matrix}\text{Inventario} \\ \text{al final del} \\ \text{mes anterior}\end{matrix} + \begin{matrix}\text{Producción} \\ \text{en el mes} \\ \text{actual}\end{matrix} - \begin{matrix}\text{Ventas} \\ \text{de este} \\ \text{mes}\end{matrix}$$

En julio se cumple que $I_1 = X_1$, debido a que no hay ni inventario previo ni ventas anteriores. En agosto,

$$I_2 = I_1 + X_2 - Y_2$$

Las restricciones para los meses restantes son las siguientes:

Septiembre: $I_3 = I_2 + X_3 - Y_3$
Octubre: $I_4 = I_3 + X_4 - Y_4$
Noviembre: $I_5 = I_4 + X_5 - Y_5$
Diciembre: $I_6 = I_5 - Y_6$

Las restricciones de capacidad de almacenamiento son

$$I_1 \leq 100, \quad I_2 \leq 100, \quad I_3 \leq 100, \quad I_4 \leq 100, \quad I_5 \leq 100$$

e $I_6 = 0$ (con el objetivo de dejar el inventario a cero al final de diciembre).

Las restricciones de demanda son

$$\text{todas } Y_i \leq 300$$

La solución final proporciona un beneficio de 19.000 dólares con

$$X_1 = 100,\quad X_2 = 200,\quad X_3 = 400,\quad X_4 = 300,\quad X_5 = 300,\quad X_6 = 0,$$
$$Y_1 = 100,\quad Y_2 = 300,\quad Y_3 = 300,\quad Y_4 = 300,\quad Y_5 = 300,\quad Y_6 = 100,$$
$$I_1 = 100,\quad I_2 = 0,\quad I_3 = 100,\quad I_4 = 100,\quad I_5 = 100,\quad I_6 = 0,$$

Existe soluciones óptimas alternativas.

Ejemplo de programación de la mano de obra

Los *problemas de programación de la mano de obra* tratan de las necesidades de personal en un periodo de tiempo determinado. Son muy útiles cuando los directores tienen cierta flexibilidad en la asignación de trabajadores a puestos de trabajo que requieran habilidades intercambiables o que se solapan. Frecuentemente, los grandes bancos y hospitales utilizan la programación lineal para tratar de resolver su programación de personal. El Ejemplo B5 describe cómo un banco utiliza la programación lineal para programar sus cajeros.

EJEMPLO B5

Programación de los cajeros de un banco

Arlington Bank of Commerce and Industry es un banco con mucho movimiento que requiere entre 10 y 18 cajeros, dependiendo de la hora del día. La hora del almuerzo, desde el mediodía hasta las dos de la tarde, es normalmente el momento con mayor afluencia de gente. La siguiente tabla indica los trabajadores que son necesarios en las diferentes horas en las que el banco está abierto.

Periodo de tiempo	Número de cajeros necesarios	Periodo de tiempo	Número de cajeros necesarios
9-10 de la mañana	10	1-2 de la tarde	18
10-11 de la mañana	12	2-3 de la tarde	17
11-mediodía	14	3-4 de la tarde	15
mediodía-1 de la tarde	16	4-5 de la tarde	10

El banco emplea ahora 12 cajeros con dedicación a tiempo completo, pero tiene a mucha gente en su lista de empleados disponibles con dedicación a tiempo parcial. Un empleado a tiempo parcial debe trabajar exactamente 4 horas al día, pero puede empezar a trabajar a cualquier hora entre las nueve de la mañana y la una de la tarde. Los empleados a tiempo parcial son una mano de obra bastante barata, debido a que no tienen prestaciones por jubilación ni comidas. Por otro lado, los empleados con dedicación a tiempo completo trabajan desde las nueve de la mañana hasta las cinco de la tarde, pero disponen de una hora libre para el almuerzo. (La mitad de los empleados a tiempo completo comen a las once de la mañana y la otra mitad al mediodía). Por tanto, un empleado a tiempo completo proporciona 35 horas semanales de tiempo productivo de trabajo.

Por política corporativa, el banco limita las horas de trabajo a tiempo parcial hasta un máximo del 50 por ciento de su total de necesidades diarias.

Los empleados a tiempo parcial ganan una media de 6 dólares por hora (o 24 dólares por día), mientras que los empleados a tiempo completo ganan una media de 75 dólares por día sumando prestaciones y salario. Al banco le gustaría establecer una programación que minimizara sus costes totales de mano de obra. El banco despediría a uno o más de sus empleados a tiempo completo si le fuera rentable hacerlo.

Sea:

F = Cajeros a tiempo completo
P_1 = Empleados a tiempo parcial que empiezan a las 9 de la mañana (se van a la 1 de la tarde)
P_2 = Empleados a tiempo parcial que empiezan a las 10 de la mañana (se van a las 2 de la tarde)
P_3 = Empleados a tiempo parcial que empiezan a las 11 de la mañana (se van a las 3 de la tarde)
P_4 = Empleados a tiempo parcial que empiezan al mediodía (se van a las 4 de la tarde)
P_5 = Empleados a tiempo parcial que empiezan a la 1 de la tarde (se van a las 5 de la tarde)

La función objetivo:

Minimizar el coste diario total de mano de obra $= 75F\$ + 24\,(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5)\$$

Las restricciones: En cada hora, las horas de mano de obra disponibles deben ser al menos iguales a las horas de mano de obra requeridas.

$F + P_1 \geq 10$ (necesidades de 9 a 10 de la mañana)
$F + P_1 + P_2 \geq 12$ (necesidades de 10 a 11 de la mañana)
$\frac{1}{2}F + P_1 + P_2 + P_3 \geq 14$ (necesidades desde las 11 hasta el mediodía)
$\frac{1}{2}F + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \geq 16$ (necesidades desde el mediodía hasta la 1 de la tarde)
$F + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \geq 18$ (necesidades de 1 a 2 de la tarde)
$F + P_3 + P_4 + P_5 \geq 17$ (necesidades de 2 a 3 de la tarde)
$F + P_4 + P_5 \geq 15$ (necesidades de 3 a 4 de la tarde)
$F + P_5 \geq 10$ (necesidades de 4 a 5 de la tarde)

Dado que sólo se dispone de 12 empleados a tiempo completo,

$$F \leq 12$$

Las horas de trabajo de los empleados a tiempo parcial no pueden superar el 50 por ciento de las horas totales requeridas cada día, que es la suma de los cajeros que se necesitan en cada hora.

$$4(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) \leq 0.50\,(10 + 12 + 14 + 16 + 18 + 17 + 15 + 10)$$

o bien

$$4P_1 + 4P_2 + 4P_3 + 4P_4 + 4P_5 \leq 0.50\,(112)$$
$$F, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 \geq 0$$

Hay dos programas alternativos óptimos que puede seguir el Arlington Bank. El primero consiste en emplear sólo diez cajeros a tiempo completo ($F = 10$), siete empleados a tiempo parcial que empiecen a las diez de la mañana ($P_2 = 7$), dos empleados a tiempo parcial que empiecen a las once de la mañana ($P_3 = 2$), otros dos al mediodía ($P_4 = 2$), y tres empleados a tiempo parcial que empiecen a la una de la tarde ($P_5 = 3$). Ningún empleado con dedicación a tiempo parcial debería empezar a las nueve de la mañana.

En la segunda solución también se emplean diez cajeros con dedicación a tiempo completo, pero se utilizan seis empleados a tiempo parcial que empiezan a las nueve de la mañana ($P_1 = 6$), un empleado a tiempo parcial que empieza a las diez de la mañana ($P_2 = 1$), dos empleados a tiempo parcial que empiezan a las once de la mañana ($P_3 = 2$), otros dos a mediodía ($P_4 = 2$), y tres empleados con dedicación a tiempo parcial que empiezan a la una de la tarde ($P_5 = 3$). El coste de cualquiera de estas dos políticas es de 1.086 dólares por día.

EL MÉTODO SIMPLEX DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL

La mayoría de los problemas de programación lineal que se plantean en el mundo real presentan más de dos variables y, por tanto, son demasiado complejos para una resolución gráfica. Para hallar la solución óptima a dichos problemas se puede utilizar un procedimiento denominado **método simplex**. El método simplex es realmente un algoritmo (o un conjunto de instrucciones) con el que, de forma metódica, se examinan los vértices hasta que se llegue a la mejor solución: el beneficio más alto o el coste más bajo. Los programas informáticos (como POM para Windows) y las hojas de cálculo de Excel están a nuestra disposición para resolver problemas de programación lineal utilizando el método del simplex.

Método simplex
Algoritmo desarrollado por Dantzig para la resolución de problemas de programación lineal de cualquier tamaño.

Para una detallada información del procedimiento algebraico del algoritmo simplex, *véase* el Tutorial 3 del CD-ROM que acompaña a este libro o bien remítase a un libro de texto sobre Investigación Operativa[2].

RESUMEN

Este módulo introduce un tipo especial de modelo, la programación lineal. La programación lineal ha demostrado ser muy útil cuando se intenta utilizar eficazmente los recursos de una organización.

La primera etapa al enfrentarse con modelos de programación lineal es la formulación del problema, que conlleva la identificación y formulación de una función objetivo y de las restricciones. La segunda etapa es la resolución del problema. Si sólo hay dos variables de decisión, el problema se puede resolver gráficamente, utilizando el método del vértice o el método de las rectas isobeneficio/isocoste. Con cualquiera de los dos métodos, se identifica primero el conjunto de soluciones posibles y posteriormente se encuentra el vértice que proporciona el mayor beneficio o el menor coste. La programación lineal se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones de negocio, como revelan los ejemplos y los problemas de este módulo.

[2] *Véase*, por ejemplo, Barry Render, Ralph M. Stair y Michael Hanna, *Quantitative Analysis for Management,* 7.ª edición (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000): Capítulos 7-9, o Barry Render, Ralph M. Stair y Raju Balakrishnan, *Managerial Decision Modeling with Spreadsheets,* 2.ª edición (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006): Capítulos 2 a 4.



Programación lineal *(p. 334)*
Función objetivo *(p. 335)*
Restricciones *(p. 335)*
Solución gráfica *(p. 337)*
Variables de decisión *(p. 337)*
Región de factible *(p. 337)*
Método de la recta isobeneficio *(p. 339)*
Método de los tres vértices *(p. 341)*
Parámetro *(p. 343)*
Análisis de sensibilidad *(p. 343)*
Precio sombra (o dual) *(p. 345)*
Recta isocoste *(p. 346)*
Método simplex *(p. 355)*

CÓMO UTILIZAR EL SOFTWARE PARA RESOLVER LOS PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN LINEAL

Todos los problemas de programación lineal se pueden también resolver con el método simplex, utilizando programas informáticos como POM para Windows o Excel. Este planteamiento genera valiosa información económica, como el precio sombra, o dual, y ofrece un completo análisis de sensibilidad de otros inputs de los problemas. Excel utiliza la herramienta Solver que requiere que usted introduzca sus propias restricciones. Excel OM no tiene un módulo de programación lineal. POM para Windows sólo requiere que se introduzcan los datos sobre la demanda, la oferta y los costes de transporte. En la siguiente sección mostramos cómo crear una hoja de cálculo de Excel para resolver los problemas de programación lineal.



Cómo utilizar las hojas de cálculo de Excel

Excel ofrece la posibilidad de analizar problemas de programación lineal utilizando herramientas que lleva incorporadas para la resolución de problemas. La herramienta de Excel se llama Solver. Solver (solucionador) está limitada a 200 celdas que cambian (variables), cada una con 2 restricciones de cota y hasta 100 restricciones adicionales. Estas propiedades proporcionan a Solver la capacidad de resolver problemas complejos del mundo real.

Utilizamos Excel para resolver el problema de Shader Electronics en el Programa B.2. La función objetivo y las restricciones se repiten a continuación:

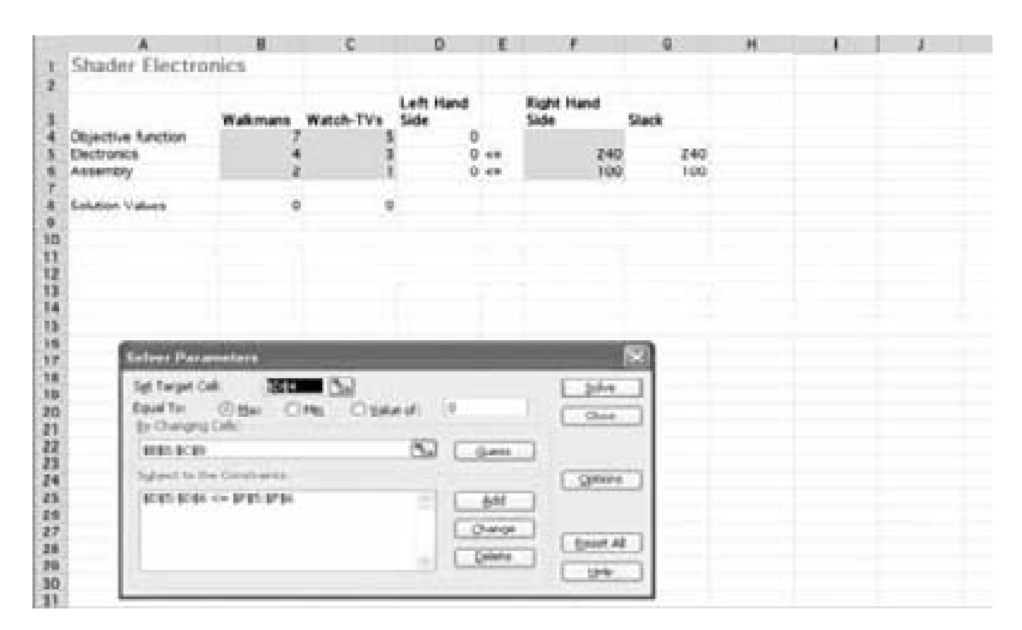
$$\begin{aligned}
\text{Función objetivo: Maximizar el beneficio } &= \\
7(\text{Número de Walkmans})\$ &+ 5(\text{Número de Watch-TV})\$ \\
\text{Sujeto a: } 4(\text{Walkmans}) &+ 3(\text{Watch-TV}) \le 240 \\
2(\text{Walkmans}) &+ 1(\text{Watch-TV}) \le 100
\end{aligned}$$

La pantalla de Excel en el Programa B3 muestra la solución obtenida por la herramienta Solver para el problema de Shader Electronics. Observe que la solución óptima se muestra ahora en las *celdas que cambian* (las celdas B8 y C8, que servían de variables). La selección de Informes ofrece un análisis más exhaustivo de la solución y de su entorno. La capacidad de análisis de sensibilidad de Excel se mostró anteriormente en el Programa B.1.



Cómo utilizar POM para Windows para resolver problemas de programación lineal

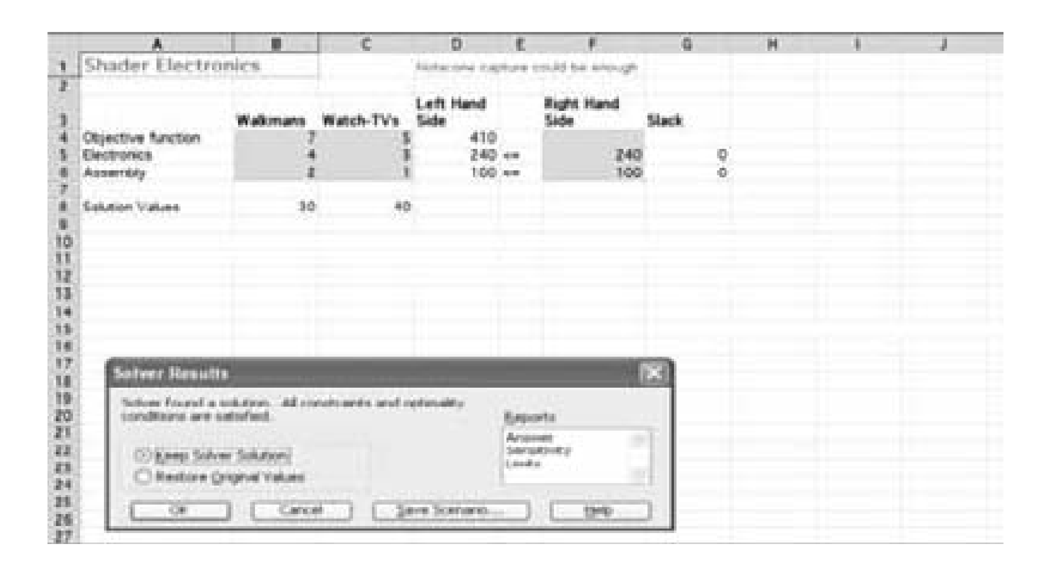
POM para Windows puede resolver problemas de programación lineal con hasta 22 restricciones y 99 variables. Como resultado, el software proporciona los valores óptimos de las variables, el beneficio o coste óptimo y el análisis de sensibilidad. Además, POM para



PROGRAMA B.2 ■ Utilización de Excel para formular el problema de Shader Electronics

Valor	Cálculos		
	Celda	Fórmula Excel	Acción
Lado izquierdo	D4	=SUMPRODUCT($B$8:$C$8, B4:C4)	Copiar a D5:D6
Holgura	G5	=F5-D5	Copiar a G6
			Seleccionar Herramientas, Solver
			Establecer los parámetros de Solver tal y como se muestra
			Hacer clic en Solver

Windows proporciona output gráfico para problemas con sólo dos variables. Para obtener detalles adicionales véase el Apéndice IV.



PROGRAMA B.3 ■ Solución de Excel al problema de programación lineal de Shader Electronics



PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto B.1

Smitty's, un fabricante de ropa que produce camisas y pijamas de caballero, tiene dos principales recursos disponibles: tiempo de máquina de coser (en el departamento de confección) y tiempo de máquina de cortar (en el departamento de corte). Para el próximo mes, Smitty puede programar hasta 280 horas de trabajo en las máquinas de coser y hasta 450 horas de trabajo en las máquinas de cortar. Cada camisa que se produce requiere 1 hora de tiempo de confección y 1,5 horas de tiempo de corte. La confección de las dos partes del pijama consume 0,75 horas de tiempo de confección y 2 horas de tiempo de corte.

Para expresar matemáticamente las restricciones de programación lineal de este problema, se tiene

X_1 = número de camisas producidas

X_2 = número de pijamas producidos

Solución

Primera restricción: $1X_1 + 0{,}75X_2 \leq 280$ horas de tiempo disponible de máquina de coser (nuestro primer recurso escaso)

Segunda restricción: $1{,}5X_1 + ②\ X_2 \leq 450$ horas de tiempo disponible de máquinas de cortar (nuestro segundo recurso escaso)

Nota: Esto significa que se invierten 2 horas del recurso de corte por cada pijama. El departamento de contabilidad de Smitty analiza los valores de los costes y las ventas y establece que cada camisa producida dará unos beneficios de 4 dólares y cada pijama 3 dólares.

Esta información se puede utilizar para crear la *función objetivo* del programa lineal para este problema:

Función objetivo: maximizar la contribución total a los beneficios = $4X_1\$ + 3X_2\$$

Problema Resuelto B.2

Utilizando el método de los vértices, se pretende resolver para Failsafe Computers el siguiente problema de programación lineal:

$$\text{Maximizar el beneficio} = 9X_1\$ + 7X_2\$$$
$$2X_1 + 1X_2 \leq 40$$
$$X_1 + 3X_2 \leq 30$$

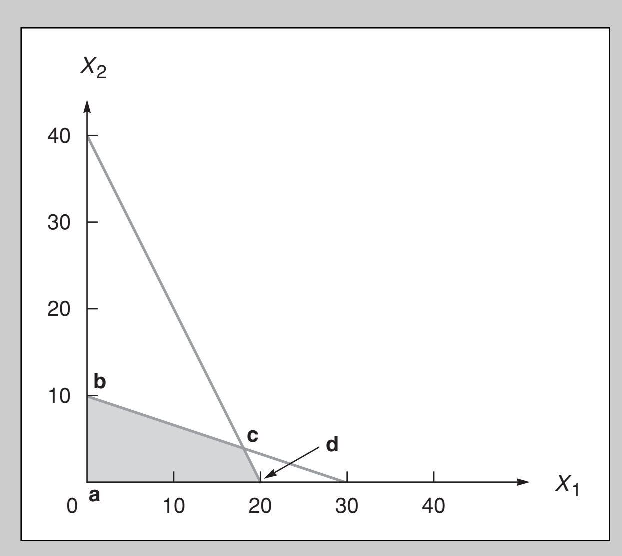


FIGURA B.10 ■
Región de factibilidad para Failsafe Computers

Solución

En la Figura B.10 se visualizan estas restricciones:

Vértice **a**: $(X_1 = 0, X_2 = 0)$ Beneficio = 0
Vértice **b**: $(X_1 = 0, X_2 = 10)$ Beneficio = 9(0) + 7(10) = 70 dólares
Vértice **d**: $(X_1 = 20, X_2 = 0)$ Beneficio = 9(20) + 7(0) = 180 dólares

El vértice c se obtiene al resolver el sistema de ecuaciones $2X_1 + 1X_2 = 40$ y $X_1 + 3X_2 = 30$. Se multiplica la segunda ecuación por −2 y se suma a la primera.

$$\begin{array}{rcr} 2X_1 + 1X_2 & = & 40 \\ -2X_1 - 6X_2 & = & -60 \\ \hline -5X_2 & = & -20 \end{array}$$

Así se tiene que $X_2 = 4$.

$$X_1 + 3(4) = 30 \quad \text{o} \quad X_1 + 12 = 30 \quad \text{o} \quad X_1 = 18$$

En el vértice **c**: $(X_1 = 18, X_2 = 4)$, el beneficio $= 9(18) + 7(4) = 190$ dólares

Por tanto, la solución óptima es

$(x_1 = 18, x_2 = 4)$ y el beneficio = 190 dólares

Problema Resuelto B.3

Holiday Meal Turkey Ranch está considerando la compra de dos clases diferentes de pienso para pavos. Cada pienso contiene, en proporciones variables, todos o alguno de los tres ingredientes nutritivos esenciales para el engorde de pavos. El pienso de la marca Y cuesta 0,02 dólares por libra, mientras el pienso de la marca Z cuesta 0,03 dólares por libra. Al ganadero le gustaría determinar la dieta de menor coste que cubra las necesidades nutritivas mínimas mensuales de cada ingrediente nutritivo.

La tabla siguiente contiene información pertinente sobre la composición de los piensos de marca Y y Z, así como la necesidad mínima mensual de cada ingrediente nutritivo por pavo.

Composición de cada libra de alimento

Ingrediente	Pienso marca Y	Pienso marca Z	Necesidad mínima mensual
A	5 onzas	10 onzas	90 onzas
B	4 onzas	3 onzas	48 onzas
C	0,5 onzas	0 onzas	1,5 onzas
Coste/libra	0,02 dólares	0,03 dólares	

Solución

Sean

X_1 = número de libras compradas de pienso de la marca Y
X_2 = número de libras compradas de pienso de la marca Z

entonces se puede proceder a formular este problema de programación lineal como se explica a continuación:

$$\text{Minimizar el coste (en céntimos)} = 2X_1 + 3X_2$$

sujeto a:

$$5X_1 + 10X_2 \geq 90 \text{ onzas} \quad (\textit{restricción para el ingrediente A})$$
$$4X_1 + 3X_2 \geq 48 \text{ onzas} \quad (\textit{restricción para el ingrediente B})$$
$$\tfrac{1}{2}X_1 \geq 1\tfrac{1}{2} \text{ onzas} \quad (\textit{restricción para el ingrediente C})$$

La Figura B.11 recoge estas restricciones.

Se puede utilizar el método de la recta isocoste para resolver problemas de minimización de programación lineal del tipo planteado para Holiday Meal Turkey Ranch. Al igual que con las rectas isobeneficio, no se necesita calcular el coste en cada vértice, pero en su lugar se debe trazar un conjunto de líneas paralelas de coste. La línea de coste inferior (esto es, la más cercana al origen) que toque la región de factibilidad proporciona el vértice con la solución óptima.

Por ejemplo, en la Figura B.12 se empieza dibujando una recta de coste en 54¢, a saber, $54 = 2X_1 + 3X_2$. Obviamente, hay bastantes puntos en la región de factibilidad que proporcionarían un coste total menor. Se procede a desplazar la recta isocoste hacia la parte inferior izquierda, en un plano paralelo a la recta de solución de 54¢. El último punto que se toca mientras que se está en contacto con la región de factibilidad es el vértice **b** de la Figura B.11. Este punto tiene las coordenadas ($X_1 = 8{,}4$, $X_2 = 4{,}8$) y un coste asociado de 31,2 céntimos.

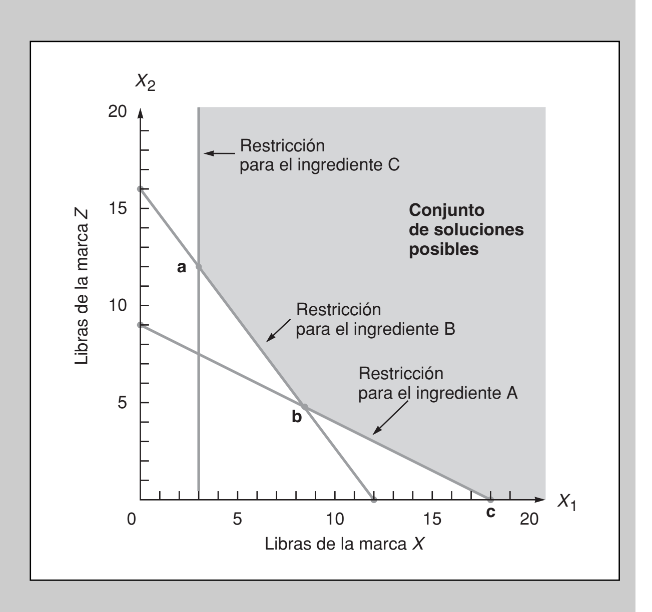


FIGURA B.11 ■ Conjunto de soluciones posibles para el problema de Holiday Meal Turkey Ranch

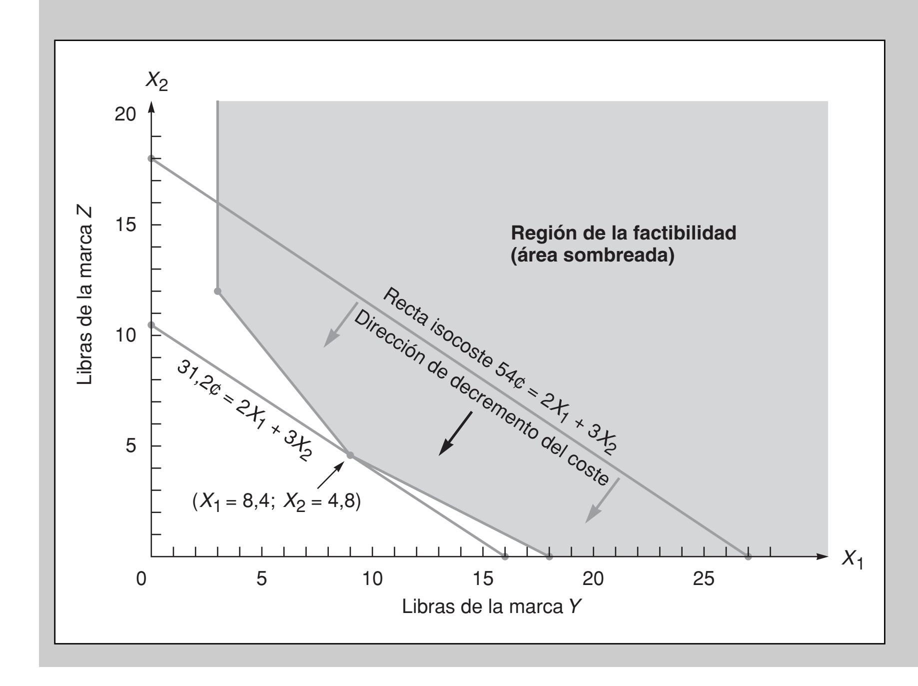


FIGURA B.12 ■ Resolución gráfica del problema de Holiday Meal Turkey Ranch utilizando la recta isocoste

Observe que la última línea paralela a la recta isocoste de 54¢ que toca la región de factibilidad indica el vértice óptimo.

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.

 En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Problemas en Internet
- Casos de estudio en Internet

 **En su CD-ROM del alumno**

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Ejercicio Active Model
- POM para Windows

CUESTIONES PARA EL DEBATE

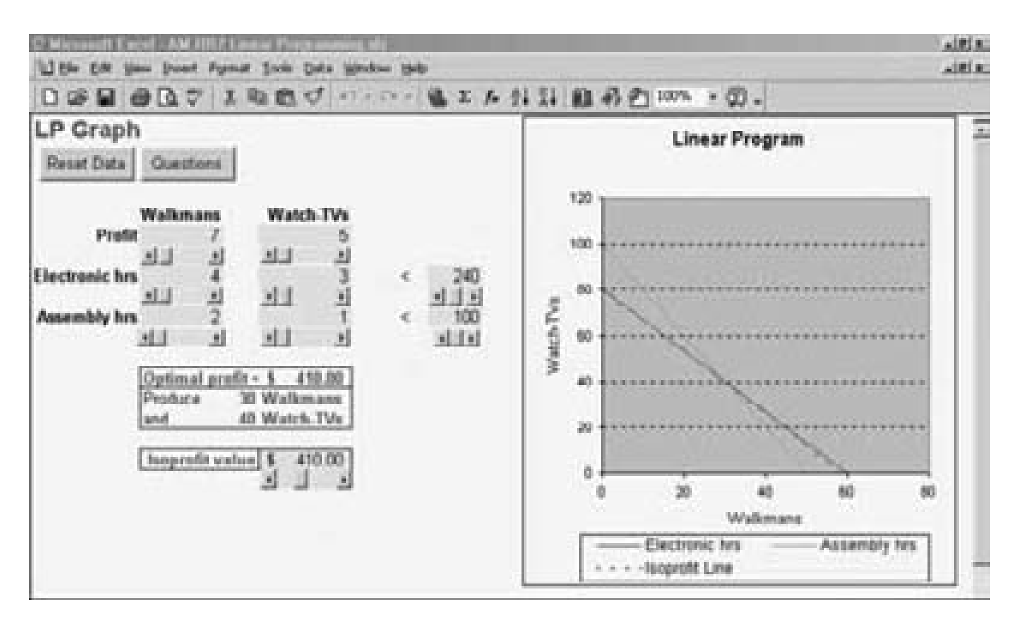
1. Dé al menos cuatro aplicaciones de problemas de programación lineal.
2. ¿Qué es un "vértice"? Explique por qué las soluciones de los problemas de programación lineal se encuentran en los vértices.
3. Defina la región de factibilidad de un problema de programación lineal gráfico. ¿Qué es una solución posible?
4. Cada problema de programación lineal que tiene una región de factibilidad tiene un número infinito de soluciones. Explique esta afirmación.
5. ¿En que circunstancias en un modelo de programación lineal es más importante la función objetivo que las restricciones?
6. ¿En que circunstancias son las restricciones más importantes que la función objetivo en un modelo de programación lineal?
7. ¿Por qué es el problema de la dieta, en la práctica, aplicable a los animales pero no a los seres humanos?
8. ¿Cuántas soluciones posibles hay en un programa lineal? ¿Cuáles tenemos que analizar para encontrar la solución óptima?
9. Defina el precio sombra (dual).
10. Explique cómo se utiliza la recta isocoste en un problema de minimización gráfica.
11. Compare cómo actúan los métodos de los vértices y de las rectas isobeneficio para resolver problemas gráficos.
12. Cuando una restricción corta al eje vertical u horizontal, el valor de las coordenadas del punto de corte es bastante evidente. ¿Qué hay que hacer para calcular el valor de las coordenadas cuando se cortan dos restricciones, y no con un eje?
13. Suponga que se ha resuelto un problema de programación lineal (maximización) y que el valor óptimo de la función objetivo es de 300 dólares. Suponga que se añade una restricción adicional a este problema. Explique cómo podría afectar a lo siguiente:

    a) La región de factibilidad.
    b) El valor óptimo de la función objetivo.



EJERCICIO ACTIVE MODEL

El ejercicio Active Model describe el problema de maximización de Shader Electronics con dos restricciones de menor o igual. Puede utilizar las barras de desplazamiento para cambiar cualquier de las ocho cifras del ejemplo, o para desplazar la recta isobeneficio.



ACTIVE MODEL B.1 ■ Análisis de los datos del ejemplo de Shader Electronics

Preguntas

1. ¿Hasta cuánto tiene que aumentar el beneficio de los Walkmans para que sea el único producto fabricado?
2. ¿Hasta cuánto tiene que disminuir el beneficio de los Walkmans para dejar de producirlos?
3. ¿Qué ocurre con el beneficio a medida que aumenta el número de horas de ensamblaje en tramos de una hora? ¿Hasta cuántas horas de aumento es verdad?
4. ¿Qué ocurre si podemos reducir el tiempo de electrónica de los Watch-TVs a 2,5 horas?

PROBLEMAS*

•  **B.1.** Resuelva gráficamente el siguiente problema de programación lineal.

$$\text{Maximizar } Z = 4X + 6Y$$

$$\text{Sujeto a: } \quad X + 2Y \leq 8$$

$$5X + 4Y \leq 20$$

$$X, Y \geq 0$$

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; significa que se puede resolver el problema con Excel OM; **P** significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

B.2. Resuelva gráficamente el siguiente problema de programación lineal.

$$\begin{aligned} \text{Maximizar} \quad & Z = X + 10Y \\ \text{Sujeto a:} \quad & 4X + 3Y \leq 36 \\ & 2X + 4Y \leq 40 \\ & Y \geq 3 \\ & X, Y \geq 0 \end{aligned}$$

B.3. Resuelva gráficamente el siguiente problema de programación lineal.

$$\begin{aligned} \text{Maximizar beneficio} \quad & = 4X_1\$ + 6X_2\$ \\ \text{Sujeto a:} \quad & X_1 + 2X_2 \leq 8 \\ & 6X_1 + 4X_2 \leq 24 \end{aligned}$$

a) ¿Cuál es la solución óptima?
b) Si se modifica la primera restricción a $X_1 + 3X_2 \leq 8$, ¿cambia la región de factibilidad o la solución óptima?

B.4. Considere el siguiente problema de programación lineal:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar} \quad & Z = 30X_1 + 10X_2 \\ \text{Sujeto a:} \quad & 3X_1 + X_2 \leq 300 \\ & X_1 + X_2 \leq 200 \\ & X_1 \leq 100 \\ & X_2 \geq 50 \\ & X_1 - X_2 \leq 0 \\ & X_1, X_2 \geq 0 \end{aligned}$$

a) Resuelva el problema gráficamente.
b) ¿Hay más de una solución óptima? Explíquelo.

B.5. Resuelva gráficamente el siguiente problema de programación lineal:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & Z = 24X + 15Y \\ \text{Sujeto a:} \quad & 7X + 11Y \geq 77 \\ & 16X + 4Y \geq 80 \\ & X, Y \geq 0 \end{aligned}$$

B.6. Ed Silver Dog Food Company desea introducir una nueva marca de galletas para perros compuesta de galletas con sabor a pollo y galletas con sabor a hígado, que cumpla ciertos requisitos nutritivos. Las galletas con sabor a hígado contienen 1 unidad del nutriente A y 2 unidades del nutriente B; mientras que las galletas con sabor a pollo contienen 1 unidad del nutriente A y 4 unidades del nutriente B. Según los requisitos del gobierno federal, cada paquete de la nueva mezcla debe contener al menos 40 unidades del nutriente A y 60 unidades del nutriente B. Además, la compañía ha decidido que no debe haber más de 15

galletas con sabor a hígado por paquete. Si cuesta 1 céntimo producir 1 galleta con sabor a hígado y 2 céntimos hacer una galleta con sabor a pollo, ¿cuál es la mezcla de producto óptima por paquete de galletas para minimizar los costes de la empresa?

a) Formule el problema como un problema de programación lineal.
b) Resuelva este problema gráficamente, dando el valor óptimo de todas las variables.
c) ¿Cuál es el coste total de un paquete de galletas para perros utilizando la combinación óptima?

• **B.7.** La compañía Electrocomp Corporation fabrica dos productos eléctricos: acondicionadores de aire y grandes ventiladores. El proceso de montaje de cada uno es similar ya que ambos requieren una cierta cantidad de cableado y taladrado. Cada acondicionador de aire necesita 3 horas de cableado y 2 horas de taladrado. En cada ventilador se deben invertir 2 horas de cableado y 1 hora de taladrado. Durante el próximo periodo de producción se dispone de 240 horas de tiempo de cableado y se pueden utilizar hasta 140 horas de tiempo de taladrado. Cada acondicionador de aire que se vende reporta un beneficio de 25 dólares. Cada ventilador ensamblado se debe vender con un beneficio de 15 dólares.

Formule y resuelva este problema de programación lineal de mix de producción, y halle la mejor combinación de acondicionadores de aire y de ventiladores de manera que se obtenga el beneficio más alto.

• **B.8.** Lauren Shur Tub Company fabrica dos líneas de bañeras, denominadas modelo A y modelo B. Cada bañera requiere combinar una cierta cantidad de acero y de cinc; y la compañía dispone de un total de 25.000 libras de acero y 6.000 libras de cinc. Cada modelo de bañera A requiere una mezcla de 125 libras de acero y 20 libras de cinc, y cada una da un beneficio de 90 dólares. Cada bañera del modelo B necesita 100 libras de acero y 30 libras de cinc y su venta proporciona un beneficio de 70 dólares.

Utilice la programación lineal gráfica y halle el mejor mix de producción de bañeras.

• **B.9.** La Grand Valley Company, dirigida por la familia J. Motwani, fabrica dos productos: colchones y somieres de camas. Un contrato anterior exige a la empresa que produzca, como mínimo, 30 colchones o somieres, en cualquier combinación, por semana. Además, el convenio colectivo exige que las máquinas de coser estén funcionando, al menos, 40 horas por semana, que es un periodo de producción. Cada somier necesita dos horas de máquina de coser, y cada colchón una hora. La producción de cada colchón cuesta 20 dólares; cada somier cuesta 24.

a) Formule este problema para minimizar los costes totales de producción.
b) Resuelva el problema gráficamente.

• **B.10.** MSA Computer Corporation fabrica dos modelos de PC, el Alfa 4 y el Beta 5. La empresa emplea 5 técnicos, y cada uno trabaja 160 horas por mes en su línea de montaje. La dirección insiste en que durante las operaciones del próximo mes se mantendrá el empleo total (esto es, *un total de* 160 horas) para cada trabajador. Se necesitan 20 horas de mano de obra para ensamblar cada PC Alfa 4 y 25 horas de mano de obra para ensamblar cada modelo Beta 5. MSA quiere que durante el periodo de producción se fabriquen al menos 10 Alfa 4 y 15 Beta 5. El modelo Alfa 4 genera un beneficio de 1.200 dólares por unidad, mientras que cada Beta 5 rinde un beneficio de 1.800 dólares.

Determine el número de PC de cada modelo que se deben producir durante el mes siguiente para obtener el mayor beneficio.

• **B.11.** La empresa Sweet Smell Fertilizer Company comercializa bolsas de estiércol en las que se lee "no menos de 60 libras de peso". El estiércol embalado es una combinación de abono orgánico y residuos. Para que el fertilizante sea de buena calidad, cada bolsa debe contener, como mínimo, 30 libras de abono orgánico, pero no más de 40 libras de residuos. Cada libra de abono orgánico cuesta 5 centavos, y cada libra de residuos cuesta 4 centavos. Utilice un método gráfico de programación lineal para determinar la mezcla de abono y residuos de menor coste en cada bolsa.

• **B.12.** Considere la siguiente formulación de programación lineal de Faud Shatara:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar el coste} &= 1X_1\$ + 2X_2\$ \\ \text{Sujeto a:} \quad X_1 + 3X_2 &\geq 90 \\ 8X_1 + 2X_2 &\geq 160 \\ 3X_1 + 2X_2 &\geq 120 \\ X_2 &\leq 70 \end{aligned}$$

a) Represente gráficamente la región de factibilidad y aplique el procedimiento de la recta isocoste para indicarle a Krista qué vértice proporciona la solución óptima.
b) ¿Cuál es el coste de esta solución?

: **B.13.** Las siguientes relaciones matemáticas fueron formuladas por Jeffrey Rummel de la Connecticut Chemical Company. ¿Cuáles no son válidas para su utilización en un problema de programación lineal, y por qué?

$$\begin{aligned} \text{Maximizar} &= 6X_1 + \tfrac{1}{2} X_1 X_2 + 5X_3 \\ \text{Sujeto a:} \quad 4X_1X_2 + 2X_3 &\leq 70 \\ 7.9X_1 - 4X_2 &\geq 15.6 \\ 3X_1 + 3X_2 + 3X_3 &\geq 21 \\ 19X_2 - \tfrac{1}{3} X_3 &= 17 \\ -X_1 - X_2 + 4X_3 &= 5 \\ 4X_1 + 2X_2 + 3\sqrt{X_3} &\leq 80 \end{aligned}$$

: **B.14.** Kalyan Singhal Corp. fabrica tres productos, y dispone de tres máquinas como recursos tal y como se muestra en el siguiente problema de programación lineal:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar la contribución} &= 4X_1 + 4X_2 + 7X_3 \\ \text{Sujeto a:} \quad 1X_1 + 7X_2 + 4X_3 &\leq 100 \text{ (horas de la máquina 1)} \\ 2X_1 + 1X_2 + 7X_3 &\leq 110 \text{ (horas de la máquina 2)} \\ 8X_1 + 4X_2 + 1X_3 &\leq 100 \text{ (horas de la máquina 3)} \end{aligned}$$

a) Determine la solución óptima utilizando un software de programación lineal.
b) ¿Se dispone de algún tiempo sin utilizar en cualquiera de las máquinas en la solución óptima?
c) ¿Le merecería la pena a la empresa tener una hora adicional en la tercera máquina?

d) ¿En cuánto aumentaría el beneficio de la empresa si se dispusiera de 10 horas adicionales de tiempo en la segunda máquina sin ningún coste adicional?

B.15. Considere el siguiente problema de programación lineal desarrollado en la empresa de escáneres ópticos Jeff Spencer de San Antonio:

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar beneficio} &= 1X_1\$ &+ 1X_2\$ & \\ &\text{Sujeto a:} & 2X_1 &+ 1X_2 &\leq 100 \\ & & 1X_1 &+ 2X_2 &\leq 100 \end{aligned}$$

a) ¿Cuál es la solución óptima para este problema? Resuélvalo gráficamente.
b) Si se produjera un avance tecnológico que elevara el beneficio unitario de X1 a 3 dólares, ¿afectaría esto a la solución óptima?
c) En vez de un incremento del coeficiente de beneficios de X_1 hasta 3 dólares, suponga que se hubiera sobreestimado dicho beneficio y que sólo fuera de 1,35 dólares. ¿Cambiaría la solución óptima?

B.16. El superintendente de educación del condado de Arden en Maryland es el responsable de la asignación de estudiantes a los tres institutos (*high schools*) de su condado. Es consciente de la necesidad de transportar en autobús a un cierto número de estudiantes, distribuidos en diferentes sectores del condado y cuya distancia al instituto es demasiado grande para ir caminando. El director divide el condado en cinco sectores geográficos, ya que trata de establecer un plan que minimice el número total de millas que los estudiantes deban recorrer en autobús. También reconoce que si un estudiante vive en determinado sector y se le asigna al instituto de ese sector, no necesita el autobús ya que puede ir caminando al instituto. Los tres institutos están situados en los sectores B, C y E.

La siguiente tabla refleja el número de estudiantes en edad escolar que viven en cada sector y la distancia en millas desde cada sector hasta cada colegio.

	Distancia al instituto			
Sector	**Instituto del sector B**	**Instituto del sector C**	**Instituto del sector E**	**Número de estudiantes**
A	5	8	6	700
B	0	4	12	500
C	4	0	7	100
D	7	2	5	800
E	12	7	0	400
				2.500

Cada colegio tiene una capacidad de 900 estudiantes.

a) Utilizando la programación lineal, halle la función objetivo y las restricciones para este problema, de manera que se minimice el número total de millas recorridas en autobús por los estudiantes.
b) Resuelva el problema.

B.17. El National Credit Union tiene disponibles 250.000 dólares para invertir en un plazo de 12 meses. El dinero se puede colocar en letras del Tesoro que ofrecen un rendimiento del

8 por ciento, o en bonos municipales con una tasa de rendimiento medio del 9 por ciento. La normativa reguladora de las cooperativas de crédito exige que se invierta de forma diversificada, invirtiéndose al menos el 50 por ciento en letras del Tesoro. Debido a los incumplimientos de pagos en municipios como Cleveland y Nueva York, se ha decidio que no se invierta más del 40 por ciento en bonos. ¿Cuánto debe invertir National Credit Union en cada tipo de título para maximizar el rendimiento de su inversión?

: P **B.18.** El famoso Limoges Restaurant de Boston está abierto las 24 horas del día. Los camareros se presentan para el servicio a las 3 de la mañana, 7 de la mañana, 11 de la mañana, 3 de la tarde, 7 de la tarde, o a las 11 de la noche, y cada uno trabaja un turno de 8 horas. La tabla siguiente recoge el número mínimo de trabajadores necesarios durante los 6 periodos en que se divide el día.

Periodo	Tiempo	Número de camareros necesarios
1	3 de la mañana-7 de la mañana	3
2	7 de la mañana-11 de la mañana	12
3	11 de la mañana-3 de la tarde	16
4	3 de la tarde-7 de la tarde	9
5	7 de la tarde-11 de la noche	11
6	11 de la noche-3 de la mañana	4

El problema de programación de la propietaria, Michelle Limoges, consiste en determinar el número de camareros que deberían empezar su trabajo al inicio de cada periodo de tiempo, para minimizar el número total de camareros necesarios durante un día. (*Pista:* Considere X_i igual al número de camareros que empiezan su trabajo en el periodo de tiempo i, siendo $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$).

• P **B.19.** Un artesano llamado Chuck Synovec construye dos tipos de jaulas para pájaros, una para carrizos y otra para azulejos. Cada jaula para carrizos requiere 4 horas de trabajo y 4 unidades de madera. Cada jaula para azulejos requiere 2 horas de trabajo y 12 unidades de madera. El artesano dispone de 60 horas de trabajo y 120 unidades de madera. Las jaulas para carrizos dan un beneficio de 6 dólares por unidad y las jaulas para azulejos proporcionan un beneficio de 15 dólares por unidad.

a) Escriba la función objetivo y las restricciones.
b) Resuelva gráficamente.

: P **B.20.** Cada mesa de café producida por Robert West Designers proporciona a la empresa unos beneficios netos de 9 dólares. Cada estantería rinde unos beneficios de 12 dólares. La empresa de West es pequeña y sus recursos son limitados. Durante cualquier periodo de producción (de 1 semana), se dispone de 10 galones de barniz y de 12 piezas de madera de secuoya de alta calidad. Cada mesa de café necesita aproximadamente 1 galón de barniz y 1 pieza de madera de secuoya. Cada estantería requiere 1 galón de barniz y 2 piezas de madera.

Formule la decisión de mix de producción de Kent como un problema de programación lineal, y resuélvalo. ¿Cuántas mesas y estanterías se deberían producir cada semana? ¿Cuál sería el beneficio máximo?

B.21. Dibuje el siguiente problema de programación lineal.

$$\text{Maximizar beneficio} = 3X_1\$ + 2X_2\$$$
$$\text{Sujeto a:} \quad 2X_1 + 1X_2 \leq 150$$
$$2X_1 + 3X_2 \leq 300$$

a) ¿Cuál es la solución óptima?
b) ¿Cambia la solución óptima si el beneficio por unidad de X_1 cambia a 4,5 dólares?
c) ¿Qué pasaría si la función de beneficios hubiera sido $3X_1\$ + 3X_2\$$?

B.22. Resuelva gráficamente el siguiente problema de programación lineal.

$$\text{Minimizar el coste} = 4X_1 + 5X_2$$
$$\text{Sujeto a:} \quad X_1 + 2X_2 \geq 80$$
$$3X_1 + X_2 \geq 75$$
$$X_1, X_2 \geq 0$$

B.23. Thompson Distributors empaqueta y distribuye suministros industriales. Un cargamento tipo se puede cargar en un contenedor de la clase A, en un contenedor de la clase K o en un contenedor de la clase T. Un contenedor individual de la clase A proporciona un beneficio de 9 dólares; un contenedor de la clase K, un beneficio de 7 dólares; y un contenedor de la clase T, un beneficio de 15 dólares. Cada cargamento preparado requiere cierta cantidad de material de embalaje y cierta cantidad de tiempo.

Recursos necesarios para un cargamento tipo

Clase de contenedor	Material de embasado (libras)	Tiempo de embasado (horas)
A	2	2
K	1	6
T	3	4
Cantidad total de recurso disponible cada semana	120 libras	240 horas

Jason Thompson, jefe de la empresa, debe decidir el número óptimo de cada clase de contenedores que se deben cargar cada semana. Se ve limitado por las restricciones de recursos previamente mencionadas, pero también decide que debe mantener a sus 6 empaquetadores empleados a tiempo completo durante 240 horas (6 trabajadores × 40 horas) cada semana.

Formule y resuelva este problema utilizando un software de programación lineal.

B.24. Utilizando los datos del Problema B.7 y un software de programación lineal:

a) Determine el intervalo dentro del cual debe estar la contribución al beneficio unitario de un acondicionador de aire para que la solución actual siga siendo óptima.
b) ¿Cuál es el precio sombra de la restricción de cableado?

B.25. La agencia de publicidad de Denver que promociona el nuevo detergente de lavavajillas Breem quiere lograr la mayor exposición posible para el producto con el presupuesto

publicitario de 100.000 dólares de que dispone. Para ello, la agencia tiene que decidir cuánto va a gastar en cada uno de sus dos medios más eficaces: (1) anuncios en televisión por la tarde y (2) grandes anuncios en el periódico del domingo de la ciudad. Cada anuncio en televisión cuesta 3.000 dólares; cada anuncio en el dominical cuesta 1.250 dólares. La exposición esperada, a partir de las ratios de la industria, es de 35.000 telespectadores por anuncio en televisión y 20.000 lectores por cada anuncio en el dominical. La directora de la agencia, Deborah Kellogg, sabe por experiencia que es importante utilizar los dos medios para llegar al mayor espectro posible de consumidores potenciales de Breem. Decide que se deben contratar, como mínimo, 5 anuncios en televisión, pero no más de 25, y que al menos hay que contratar 10 anuncios en el periódico. ¿Cuántas veces hay que utilizar cada uno de los dos medios para lograr la mayor exposición posible sin sobrepasar el presupuesto? Utilice un método gráfico para resolver el problema.

B.26. Libby Temple Manufacturing tiene tres fábricas (1, 2 y 3) y tres almacenes (A, B y C). La siguiente tabla recoge los costes de transporte entre cada fábrica y almacén, las capacidades de producción de las fábricas (en miles) y las capacidades de los almacenes (en miles).

a) Escriba la función objetivo y las ecuaciones de las restricciones. Sea X_{1A} = los miles de unidades transportadas de la fábrica 1 hasta el almacén A, etc.
b) Resuelva el problema mediante un programa informático.

Desde \ Hasta	A	B	C	Capacidad de producción
Fábrica 1	6 dólares	5 dólares	3 dólares	6
Fábrica 2	8 dólares	10 dólares	8 dólares	8
Fábrica 3	11 dólares	14 dólares	18 dólares	10
Capacidad	7	12	5	

B.27. Un fabricante de fertilizantes tiene que suministrar los pedidos de sus principales clientes (650 toneladas al cliente A y 800 toneladas al cliente B). Puede satisfacer esta demanda enviando desde el inventario existente en cualquiera de sus tres almacenes. El Almacén 1 (A1) tiene 400 toneladas de inventario disponible, el Almacén 2 (A2) tiene 500 toneladas y el Almacén 3 (A3) tiene 600 toneladas. La empresa quiere organizar el envío al menor coste posible, con los siguientes costes de tránsito por tonelada:

	A1	A2	A3
Cliente A	7,50$	6,25$	6,50$
Cliente B	6,75	7,00	8,00

a) Explique qué es cada una de las seis variables de decisión (V): (*Pista:* Analice el informe de Solver más abajo).

V1: ____________________
V2: ____________________
V3: ____________________
V4: ____________________
V5: ____________________
V6: ____________________

b) Escriba la función objetivo en términos de las variables (V1, V2, etc.) y de los coeficientes objetivo.

c) Aparte de la no negatividad de las variables, ¿cuáles son las cinco restricciones? Redacte una breve descripción de cada restricción y escriba la fórmula (y marque el tipo de igualdad/desigualdad).

	Descripción	Variables y coeficientes	¿Qué tipo?	Término independiente
C1:	__________________	Fórmula___________________	(=> | = | =<)	___________________
C2:	__________________	Fórmula___________________	(=> | = | =<)	___________________
C3:	__________________	Fórmula___________________	(=> | = | =<)	___________________
C4:	__________________	Fórmula___________________	(=> | = | =<)	___________________
C5:	__________________	Fórmula___________________	(=> | = | =<)	___________________

Tras formular e introducir el programa lineal en Excel, la herramienta Solver le proporciona el siguiente informe de sensibilidad:

Celdas ajustables

Celda	Nombre	Valor final	Coste reducido	Coeficiente objetivo	Aumento permisible	Disminución permisible
B6	V1	0	1,5	7,5	1E+30	1,5
C6	V2	100	0	6,25	0,25	0,75
D6	V3	550	0	6,5	0,75	0,25
E6	V4	400	0	6,75	0,5	1E+30
F6	V5	400	0	7	0,75	0,5
G6	V6	0	0,75	8	1E+30	0,75

Restricciones

Celda	Nombre	Valor final	Precio sombra	Término independiente de la restricción	Aumento permisible	Disminución permisible
H7	C1	650	6,5	650	50	550
H8	C2	800	7,25	800	50	400
H9	C3	400	−0,5	400	400	50
H10	C4	500	−0,25	500	550	50
H11	C5	550	0	600	1E+30	50

d) ¿Cuántas de las restricciones son vinculantes?

e) ¿Cuánta holgura/excedente hay con las restricciones no vinculantes?

f) ¿Cuál es el intervalo de optimalidad de la variable V3? De_________a_________.

g) Si pudiésemos enviar 10 toneladas menos al Cliente A, ¿cuánto dinero *podríamos* ahorrar? Si decidiéramos recortar el suministro en 10 toneladas, *o bien* al Consumidor A *o bien* al Consumidor B, ¿a quién preferiríamos recortar el suministro? ¿Por qué?

B.28. El Hospital Monte Sinaí de Nueva Orleans es un gran hospital privado que dispone de 600 camas y cuenta con laboratorios, quirófanos y equipo de rayos X. Para aumentar los ingresos, la dirección del hospital ha decidido construir una nueva ala con 90 camas en un terreno adyacente usado en la actualidad como aparcamiento para el personal. La dirección cree que los laboratorios, los quirófanos y el departamento de rayos X no se están utili-

zando a plena capacidad y no considera necesaria su ampliación para tratar a los pacientes adicionales. Sin embargo, el aumento de 90 camas conlleva decidir cuántas camas se deberían asignar al área médica (pacientes médicos) y cuántas al área quirúrgica (pacientes quirúrgicos).

Los departamentos de contabilidad y de registros médicos del hospital han proporcionado la siguiente información. La estancia media en el hospital de un paciente médico es de 8 días, y el paciente médico medio genera unos ingresos de 2.280 dólares. La estancia media en el hospital de un paciente quirúrgico es de 5 días, y genera unos ingresos de 1.515 dólares. El laboratorio es capaz de realizar 15.000 pruebas anuales más de las que *hace* en la actualidad. Un paciente médico medio requiere 3,1 pruebas de laboratorio, mientras que la media de un paciente quirúrgico es de 2,6 pruebas de laboratorio. Además, el paciente médico medio necesita una sesión de rayos X, mientras que el paciente quirúrgico medio necesita 2 sesiones de rayos X. Si el hospital incrementara su capacidad en 90 camas, el departamento de rayos X podría realizar sin coste adicional significativo hasta 7.000 sesiones de rayos X. Finalmente, la dirección estima que se podrían realizar hasta 2.800 operaciones más en los quirófanos existentes. Los pacientes médicos, por supuesto, no necesitan intervención quirúrgica, mientras que generalmente a cada paciente quirúrgico se le realiza una intervención.

Formule este problema de manera que se determine el número de camas médicas y el número de camas quirúrgicas que se deberían añadir para conseguir maximizar los ingresos. Considere que el hospital está abierto los 365 días del año.

B.29. Charles Watts Electronics fabrica los seis siguientes dispositivos periféricos utilizados en computadoras especialmente diseñados para los aviones de combate: módems internos, módems externos, tarjetas gráficas, disqueteras, discos duros y tarjetas de expansión de memoria. Cada uno de estos productos técnicos requiere tiempo, en minutos, de tres tipos de equipos de pruebas electrónicas, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

	Módem interno	Módem externo	Tarjeta gráfica	Disquetera	Disco duro	Tarjeta de memoria
Dispositivo de prueba 1	7	3	12	6	18	17
Dispositivo de prueba 2	2	5	3	2	15	17
Dispositivo de prueba 3	5	1	3	2	9	2

Los dos primeros dispositivos de prueba están disponibles 120 horas por semana. El tercero (dispositivo 3) necesita más mantenimiento preventivo y sólo se puede utilizar 100 horas cada semana. El mercado de los seis componentes de computadora es enorme, y Watts Electronics cree que puede vender tantas unidades de cada producto como pueda producir. La siguiente tabla resume los ingresos y los costes de materiales de cada producto:

Dispositivo	Ingresos por unidad vendida ($)	Coste de material por unidad ($)
Módem interno	200	35
Módem externo	120	25
Tarjeta gráfica	180	40
Disquetera	130	45
Disco duro	430	170
Tarjeta de expansión de memoria	260	20

Además, los costes variables de mano de obra son de 15 dólares por hora para el dispositivo de prueba 1, 12 dólares par el segundo y 18 dólares para el tercero. Watts Electronics quiere maximizar sus beneficios.

a) Formule este problema como un modelo de programación lineal.
b) Resuelva el problema con computadora. ¿Cuál es el mejor mix de productos?
c) ¿Qué valor tiene un minuto de tiempo adicional por semana en el dispositivo de prueba 1? ¿Y en el 2? ¿Y en el 3? ¿Debería Watts Electronics añadir más disponibilidad de tiempo para los dispositivos de prueba? En caso afirmativo, ¿en cuál o cuáles?

B.30. Susan Chollette, dietista del campus en una pequeña universidad de California, es responsable de definir un plan de comidas nutritivo para los alumnos. Para la cena, considera que se deberían cumplir los cinco siguientes requisitos de contenidos: (1) entre 900 y 1.500 calorías; (2) al menos 4 miligramos de hierro; (3) no más de 50 gramos de materia grasa; (4) al menos 26 gramos de proteínas; y (5) no más de 50 gramos de hidratos de carbono. En un día cualquiera, el stock de alimentos del que dispone Susan incluye siete artículos que se pueden preparar y servir como cena para satisfacer estos requisitos. En la siguiente tabla se muestra el coste por libra de cada artículo alimentario y su contribución de cada uno de los cinco requisitos nutritivos:

Tabla de valores alimentarios[a] y costes

Alimento	Calorías/ libra	Hierro (mg/lb)	Grasa (g/lb)	Proteínas (g/lb)	Hidratos de carbono (g/lb)	Coste/ libra ($)
Leche	295	0,2	16	16	22	0,60
Carne picada	1.216	0,2	96	81	0	2,35
Pollo	394	4,3	9	74	0	1,15
Pescado	358	3,2	0,5	83	0	2,25
Judías	128	3,2	0,8	7	28	0,58
Espinacas	118	14,1	1,4	14	19	1,17
Patatas	279	2,2	0,5	8	63	0,33

[a] Tomado de C. F. Church y H. N. Church, Bowes y Church, *Food Values of Portions Commonly Used*, 12.ª edición. Filadelfia: J. B. Lippincott, 1975.

¿Qué combinaciones y cantidades de alimentos proporcionarán el aporte nutritivo que busca Susan al menor coste posible?

a) Formule el problema como un problema de programación lineal.
b) ¿Cuál es el coste por comida?
c) ¿Se trata de una dieta bien equilibrada?
d) ¿Hasta qué punto es sensible la solución a las variaciones del precio de la leche, la carne picada, el pescado y el pollo?



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: B.31 a B.40.

Caso de estudio

Golding Landscaping & Plants, Inc. (Jardinería y Plantas Golding)

Kenneth y Patricia Golding han desarrollado una carrera profesional como una sociedad colectiva, marido y mujer, de inversión en bienes inmobiliarios en Washington, DC. Cuando finalmente se jubilaron a una granja de 10 hectáreas en Fairfax County, al noroeste de Virginia, se convirtieron en unos apasionados jardineros. Kenneth plantó arbustos y árboles frutales, y Patricia pasó su tiempo plantando en macetas plantas de todos los tamaños. Cuando el volumen de arbustos y de plantas alcanzó tal punto que los Golding empezaron a pensar en convertir su afición en un importante filón, construyeron un invernadero adyacente a su hogar e instalaron sistemas de calefacción y riego.

En 2005, los Golding comprendieron que el retirarse del negocio de bienes inmobiliarios simplemente había dado paso a una segunda carrera profesional, en el negocio de las plantas y los arbustos, y entonces solicitaron una licencia de negocios en Virginia. En unos meses solicitaron a su abogado que reuniera la documentación oportuna y formaron la empresa Golding Landscaping & Plants, Inc.

Al poco de la existencia del nuevo negocio, Kenneth Golding se dio cuenta de la necesidad de un fertilizante comercial de alta calidad que podría mezclar él mismo, tanto para su venta como para su propio vivero. Su objetivo era mantener sus costes a un nivel mínimo mientras producía un producto de primera que era especialmente adecuado para el clima del noroeste de Virginia.

Trabajando con químicos de la George Mason University, Golding consiguió la mezcla "Golding-Grow". Estaba formada por cuatro compuestos químicos: C–30, C–92, D–21 y E–11. El coste por libra de cada compuesto se indica en la siguiente tabla:

Compuesto químico	Coste por libra
C–30	0,12 dólares
C–92	0,09
D–21	0,11
E–11	0,04

Las especificaciones de la Golding-Grow estaban fijadas como sigue:

a) La mezcla debe estar compuesta al menos por el 15 por ciento del compuesto químico E–11.
b) La suma de C–92 y C–30 debe constituir al menos el 45 por ciento de la mezcla.
c) El conjunto de D–21 y C–92 debe constituir no más del 30 por ciento de la mezcla.
d) Golding-Grow se debe envasar y vender en bolsas de 50 libras.

Preguntas para el debate

1. Formule un problema de programación lineal para determinar qué mezcla de los cuatro compuestos químicos le permitirá a Golding minimizar el coste de una bolsa de 50 libras del fertilizante.
2. Resuelva el problema para encontrar la mejor solución.

Casos de estudio adicionales

Visite nuestra página personal <u>www.prenhall.com/heizer</u> para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Mexicana Wire Works:** Este caso de determinación de la capacidad en un empresa mexicana de instalaciones eléctricas trata sobre el backordering (pedidos aceptados y no fabricados) frente a la utilización de trabajadores temporales.
- **Coastal States Chemical:** Este caso de planificación de producción versa sobre la resolución del problema de los cortes de suministro en la disponibilidad de gas natural.
- **Chase Manhattan Bank:** Este caso de programación tiene por asunto encontrar el número óptimo de empleados a tiempo completo y a tiempo parcial en un banco.



BIBLIOGRAFÍA

Bard, J. F. "Staff Scheduling in High Volume Services with Downgrading". *IIE Transactions* 36 (octubre 2004): p. 985.

Begley, S. "Did You Hear About the Salesman Who Travelled Better". *OR/MS Today* 31 (enero 2004): p. 20.

Brown, G., *et al.* "The Kellogg Company Optimizes Production, Inventory, and Distribution". *Interfaces* 31 (noviembre-diciembre 2001): pp. 1-15.

Chakravarti, N. "Tea Company Steeped in OR". *OR/MS Today* 27 (abril 2000): pp. 32-34.

Desroisers, Jacques. "Air Transat Uses ALTITUDE to Manage Its Aircraft Routing, Crew Pairing, and Work Assignment". *Interfaces* 30 (marzo-abril 2000): pp. 41-53.

Gautier, Antoine, Bernard F. Lamond, Daniel Pare, y Francois Rouleau. "The Quebec Ministry of Natural Resources Uses Linear Programming to Understand the Wood-Fiber Market". *Interfaces* 30 (noviembre 2000): pp. 32-48

Jayaraman, V., R. Srivastava, y W. C. Benton. "Supplier Selection and Order Quantity Allocation". *Journal of Supply Chain Management* 35 (spring 1999): pp. 50-58.

Le Blanc, Larry J., *et al.* "Nu-Kote's Spreadsheet Linear Programming Models for Optimizing Transportation". *Interfaces* 34 (marzo-abril 2004): pp. 139-146.

Lyon, Peter, R. John Milne, Robert Orzell, y Robert Rice. "Matching Assets with Demand in Supply-Chain Management at IBM Microelectronics". *Interfaces* 31 (enero 2001): pp. 108-124.

Neureuther, B. D., G. G. Polak, y N. R. Sanders. "A Hierarchical Production Plan for a Make-to-order Steel Fabrication Plant". *Production Planning & Control* 15 (abril 2004): p. 324.

Pate-Cornell, M. E., y T. L. Dillon. "The Right Stuff". *OR/MS Today* 27 (febrero 2000): pp. 36-39.

Render, B., R. M. Stair, y Michael Hanna. *Quantitative Analysis for Management*, 9.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Render, B., R. M. Stair, y R. Balakrishman. *Managerial Decision Modeling with Spreadsheets*. 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Ryan, David M. "Optimization Earns Its Wings". *OR/MS Today* 27 (abril 2000): pp. 26-30.

Sodhi, M. S., y S. Norri. "A Fast and Optimal Modeling Approach Applied to Crew Rostering at London Underground". *Annals of OR* 127 (marzo 2004): p. 259.

Taylor, Bernard. *Introduction to Management Science*, 8.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2005.

MÓDULO CUANTITATIVO C

MODELOS DE TRANSPORTE

CONTENIDO DEL MÓDULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando acabe este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

- Modelización del transporte
- Análisis de la localización de instalaciones

Describir o explicar:

- La regla del rincón noroeste
- Método stepping-stone

Debido a que la localización de una nueva fábrica, almacén o centro de distribución es una cuestión estratégica con importantes efectos sobre los costes, la mayoría de las empresas evalúan y toman en consideración diferentes localizaciones. Al tener un amplio abanico de factores objetivos y subjetivos que considerar, las decisiones racionales se apoyan en unas cuantas técnicas. Una de esas técnicas es la modelización del transporte.

Los modelos de transporte descritos en este módulo demuestran su utilidad cuando se consideran diferentes alternativas para la localización de instalaciones *en el marco de un sistema de distribución existente*. Cada nueva fábrica, almacén o centro de distribución potencial necesitará una asignación de envíos diferente, dependiendo de su propia producción y costes de envío, y de los costes de cada una de las instalaciones existentes. La elección de una nueva localización depende de cuál sea la que proporcione el menor coste *para el conjunto* del sistema.

Modelización del transporte
Procedimiento iterativo para resolver problemas que tratan de minimizar los costes de distribución de productos desde una serie de orígenes (fuentes) a una serie de destinos.

MODELIZACIÓN DEL TRANSPORTE

La **modelización del transporte** encuentra la forma más barata de enviar suministros desde diversos orígenes a diferentes destinos. *Los orígenes* (o *fuentes*) pueden ser fábricas, almacenes, agencias de alquiler de automóviles como Avis, o cualquier otro punto desde el que se distribuyen bienes. Los *destinos* son cualquier punto que recibe los bienes. Para la utilización del modelo de transporte, tenemos que saber:

El problema al que se enfrentan las empresas de alquiler de automóviles, como Avis, Hertz y National, es el de los viajes por todo el país. Muchos de estos viajes. Automóviles alquilados en Nueva York acaban en Chicago, automóviles de Los Ángeles llegan a Filadelfia, y automóviles de Boston llegan a Miami. La escena se repite en más de 100 ciudades de Estados Unidos. Por ello, hay demasiados automóviles en unas ciudades y demasiado pocos en otras. Los directores de operaciones deben decidir cuántos de esos automóviles de alquiler tienen que llevarse (en costosos camiones) desde cada ciudad con exceso de capacidad de automóviles a cada ciudad que necesite más automóviles para alquilar. El proceso exige una respuesta rápida y por el itinerario más económico, por lo que las empresas de alquiler de automóviles recurren a modelos de transporte.

1. Los puntos de origen y la capacidad o suministro por periodo de cada uno.
2. Los puntos de destino y la demanda por periodo de cada uno.
3. El coste de enviar una unidad desde cada origen a cada destino.

El modelo de transporte es, en realidad, uno de los modelos de programación lineal comentados en el Módulo Cuantitativo B. Como ocurría con la programación lineal, existen programas informáticos para resolver los problemas de transporte. Pero para poder utilizar a pleno rendimiento estos programas, sin embargo, es necesario entender las hipótesis que subyacen en el modelo. Para ilustrar un problema de transporte, en este módulo estudiaremos una empresa llamada Arizona Plumbing, que fabrica, entre otros productos, una línea completa de bañeras. En nuestro ejemplo, la empresa tiene que decidir desde qué fábricas debe suministrar a cuáles de sus almacenes. Los datos pertinentes de Arizona Plumbing se presentan en la Tabla C.1 y en la Figura C.1. La Tabla C.1 muestra, por ejemplo, que a Arizona Plumbing le cuesta 5 dólares mandar una bañera desde su fábrica de Des Moines a su almacén de Albuquerque, 4 dólares a Boston y 3 dólares a Cleveland. Asimismo, vemos en la Figura C.1 que las 300 unidades que necesita el almacén de Albuquerque de Arizona Plumbing, podrían ser enviadas según varias combinaciones desde sus fábricas de Des Moines, Evansville y Fort Lauderdale.

TABLA C.1 ■ Coste de transporte por bañera de Arizona Plumbing

Desde \ Hasta	Albuquerque	Boston	Cleveland
Des Moines	5$	4$	3$
Evansville	8$	4$	3$
Fort Lauderdale	9$	7$	5$

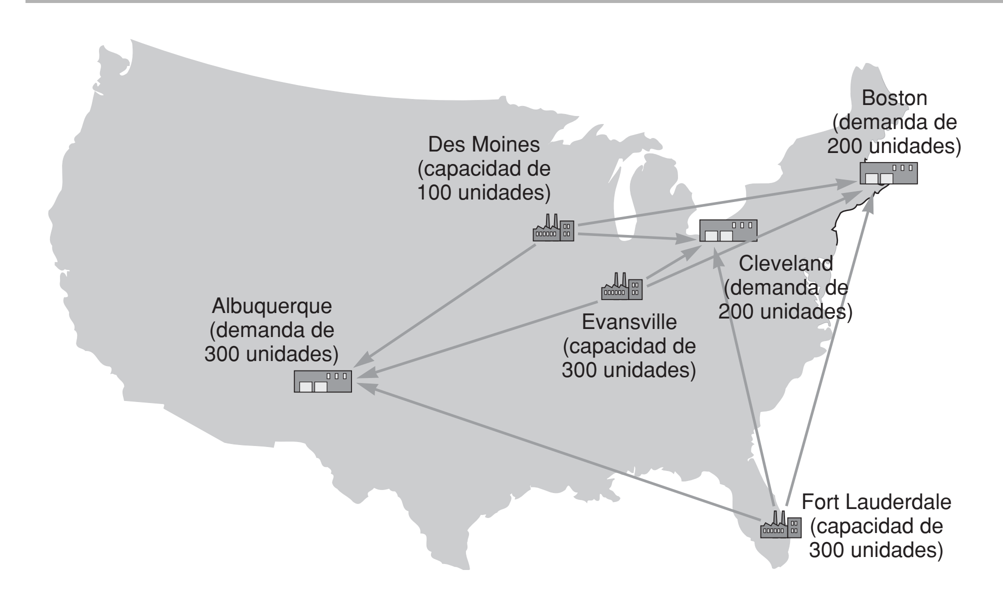


FIGURA C.1 ■ Problema de transporte

Desde \ Hasta	Albuquerque	Boston	Cleveland	Capacidad de la fábrica
Des Moines	5$	4$	3$	100
Evansville	8$	4$	3$	300
Fort Lauderdale	9$	7$	5$	300
Demanda del almacén	300	200	200	700

Restricción de capacidad de Des Moines

La celda representa una posible asignación de un envío de origen a destino (Evansville a Cleveland)

Coste de enviar 1 unidad de la fábrica de Fort Lauderdale al almacén de Bostón

Demanda del almacén de Cleveland

Demanda total y oferta total

FIGURA C.2 ■ Tabla de transporte para Arizona Plumbing

El primer paso para realizar el modelo consiste en elaborar una tabla de transporte. Su propósito es resumir todos los datos pertinentes y realizar el seguimiento de los cálculos del algoritmo. Utilizando la información presentada en la Figura C.1 y la Tabla C.1, podemos elaborar una tabla de transporte, tal y como se muestra en la Figura C.2.

DESARROLLO DE UNA SOLUCIÓN INICIAL

Una vez que los datos se han organizado en forma tabular, debemos determinar una solución inicial factible para el problema. Se ha desarrollado una serie de métodos para este paso. Comentaremos dos de ellos: la regla del rincón noroeste y el método intuitivo del menor coste.

La regla del rincón noroeste

Regla del rincón noroeste Procedimiento del modelo de transporte en el que se empieza por la celda superior izquierda de la tabla (el rincón noroeste) y sistemáticamente asigna unidades a las rutas de envío.

La **regla del rincón noroeste** requiere que empecemos por la celda superior izquierda del cuadro (el rincón noroeste) y asignemos unidades a las rutas de envío de la siguiente manera:

1. Agotar la oferta (capacidad de fábrica) de cada fila (p. ej., Des Moines: 100), antes de pasar a la fila siguiente.
2. Agotar las necesidades (de almacén) de cada columna (p. ej., Albuquerque: 300) antes de pasar a la columna siguiente a la derecha.
3. Comprobar que todas las ofertas y demandas están cubiertas.

El Ejemplo C1 aplica la regla del rincón noroeste a nuestro problema de Arizona Plumbing.

EJEMPLO C1

La regla del rincón noroeste

En la Figura C.3 utilizamos la regla del rincón noroeste para hallar una solución inicial factible al problema de Arizona Plumbing. Para hacer nuestra asignación inicial de envíos, necesitamos cinco pasos:

1. Asignar 100 bañeras desde Des Moines a Albuquerque (agotando la oferta de Des Moines).
2. Asignar 200 bañeras desde Evansville a Albuquerque (completando la demanda de Albuquerque).
3. Asignar 100 bañeras desde Evansville a Boston (agotando la oferta de Evansville).
4. Asignar 100 bañeras desde Fort Lauderdale a Boston (completando la demanda de Boston).
5. Asignar 200 bañeras desde Fort Lauderdale a Cleveland (completando la demanda de Cleveland y la oferta de Fort Lauderdale).

El coste total de esta asignación de envíos es de 4.200 dólares (*véase* la Tabla C.2).

La regla del rincón noroeste es fácil de usar, pero ignora totalmente los costes.

Desde \ Hasta	(A) Albuquerque	(B) Boston	(C) Cleveland	Capacidad de la fábrica
(D) Des Moines	5$ 100	4$	3$	100
(E) Evansville	8$ 200	4$ 100	3$	300
(F) Fort Lauderdale	9$	7$ 100	5$ 200	300
Demanda del almacén	300	200	200	700

Significa que la empresa manda 100 bañeras de Fort Lauderdale a Boston

FIGURA C.3 ■ Solución del rincón noroeste al problema de Arizona Plumbing

TABLA C.2 ■ Cálculo del coste de los envíos

Ruta				
Desde	Hasta	Bañeras enviadas	Coste unitario	Coste total
D	A	100	5$	500$
E	A	200	8$	1.600$
E	B	100	4$	400$
F	B	100	7$	700$
F	C	200	5$	1.000$
			Total:	4.200$

La solución proporcionada es una solución posible porque satisface todas las restricciones de demanda y oferta.

El método intuitivo del menor coste

El **método intuitivo** hace asignaciones iniciales en función del coste más bajo. Este sencillo enfoque consta de los siguientes pasos:

Método intuitivo
Enfoque basado en el coste para hallar una solución inicial a un problema de transporte.

1. Identificar la celda con el menor coste. Deshacer arbitrariamente cualquier empate para determinar la celda de menor coste.

El método intuitivo del menor coste

EJEMPLO C2

Cuando aplicamos el enfoque intuitivo a los datos de la Figura C.2 (en vez de la regla del rincón noroeste) obtenemos la solución que se muestra en la Figura C.4 como punto de partida.

El coste total de este enfoque es = 3$(100) + 3$(100) + 4$(200) + 9$(300) = 4,100$
(D a C) (E a C) (E a B) (F a A)

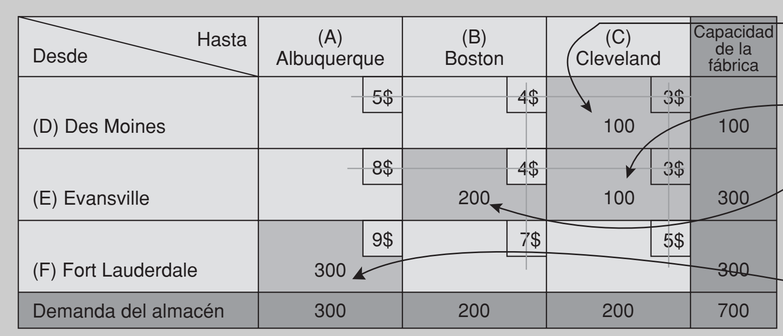


FIGURA C.4 ■ Solución intuitiva del menor coste para el problema de Arizona Plumbing

2. Asignar tantas unidades como sea posible a esa celda sin sobrepasar la oferta o demanda, para a continuación tachar esa fila o columna (o ambas) que queda así agotada/completada por esta asignación.
3. Hallar la celda con el menor coste entre las celdas restantes (no tachadas).
4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta que todas las unidades hayan sido asignadas.

Aunque la probabilidad de obtener una solución de coste mínimo *aumenta* con el método intuitivo, habríamos sido afortunados si la solución intuitiva nos hubiera dado el coste mínimo. En este caso, al igual que en la solución del rincón noroeste, no ha sido así. Dado que los enfoques del rincón noroeste y del intuitivo del menor coste sólo están pensados para darnos un punto de partida, a menudo tendremos que emplear un procedimiento adicional para lograr a una solución óptima.

EL MÉTODO STEPPING-STONE (PASO A PASO)

Método stepping-stone
Técnica iterativa para pasar de una solución inicial posible a una solución óptima en el método de transporte.

El método **stepping-stone** nos ayudará a pasar de una solución inicial posible a una solución óptima. Se usa para evaluar el efecto que tendría en el coste el enviar bienes por rutas de transporte no utilizadas en la solución actual. Al aplicarlo, comprobamos cada una de las celdas o recuadros sin utilizar en la tabla de transporte con la pregunta: "¿Qué pasaría con los costes totales de envío si una unidad del producto (por ejemplo, una bañera) se intentase enviar por una ruta no utilizada?" Así es como procederíamos:

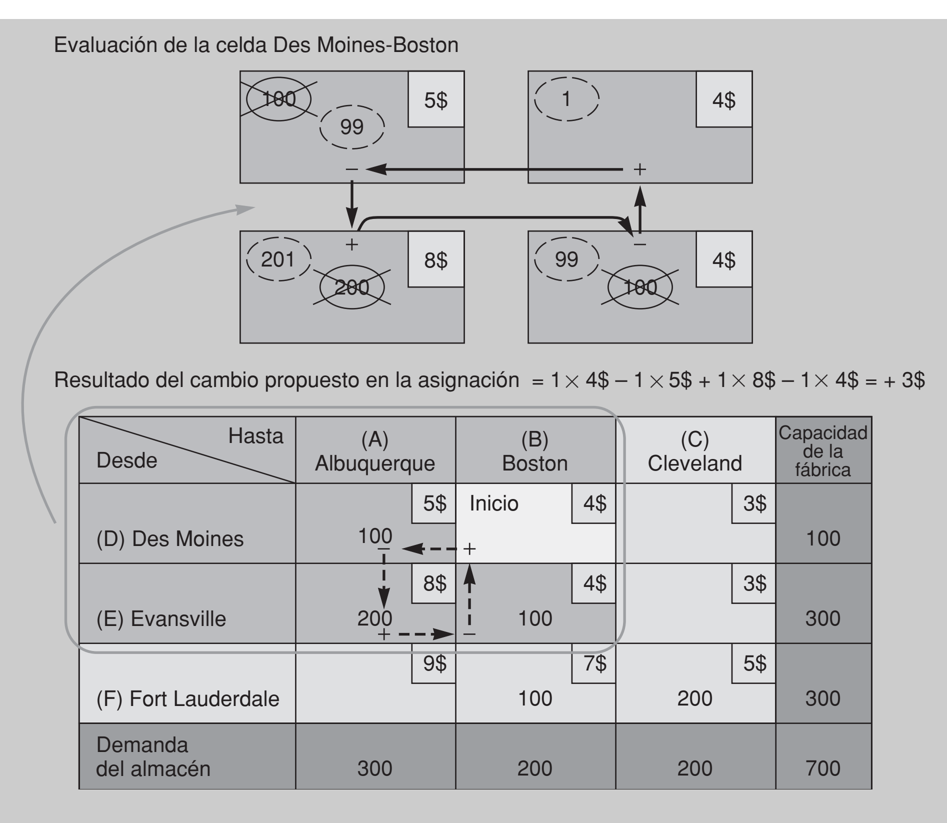
1. Se selecciona cualquier celda no utilizada en la solución para su evaluación.
2. Comenzando en este recuadro, se traza un camino cerrado hasta volver a este recuadro inicial vía celdas que se están utilizando (sólo se permiten movimientos horizontales y verticales). Sí se puede, en cambio, saltar un recuadro vacío u ocupado.
3. Empezando con un signo más (+) en la celda sin utilizar, se colocan alternativamente signos menos (−) y más (+) en el rincón de cada celda del camino cerrado que se acaba de trazar.
4. Se calcula un índice de mejora sumando primero las cifras de coste unitario que hay en cada celda que contenga un signo más y luego restando los costes unitarios que hay en cada celda que contenga un signo menos.
5. Se repiten los pasos 1 a 4 hasta que se haya calculado un índice de mejora para todas las celdas sin utilizar. Si todos los índices calculados son *superiores o iguales a cero*, la solución que se tiene es una solución óptima. De lo contrario, se puede mejorar aún más la solución actual para reducir los costes totales de envío.

El Ejemplo C3 muestra cómo se aplica el método *stepping-stone* para llegar a una solución óptima. Empezamos con la solución inicial del rincón noroeste encontrada en el Ejemplo 1.

EJEMPLO C.3

Comprobación de las rutas no usadas con el método stepping-stone

Podemos aplicar el método *stepping-stone* a los datos de Arizona Plumbing de la Figura C.3 (*véase* el Ejemplo C1) para evaluar rutas de envío no utilizadas. Como puede verse, las cuatro rutas actualmente sin utilizar son: Des Moines a Boston, Des Moines a Cleveland, Evansville a Cleveland y Fort Lauderdale a Albuquerque.



Desde \ Hasta	(A) Albuquerque	(B) Boston	(C) Cleveland	Capacidad de la fábrica
(D) Des Moines	5$ 100 –	Inicio 4$ +	3$	100
(E) Evansville	8$ 200 +	4$ 100 –	3$	300
(F) Fort Lauderdale	9$	7$ 100	5$ 200	300
Demanda del almacén	300	200	200	700

FIGURA C.5 ■ Evaluación stepping-stone de rutas alternativas para Arizona Plumbing

Archivo de datos de Excel OM ModCExC3.xla

Pasos 1 y 2. Empezando por la ruta Des Moines-Boston, se traza primero un camino cerrado *utilizando sólo las celdas ocupadas actualmente* (véase la Figura C.5). Se colocan alternativamente signos positivos y negativos en las celdas de este camino. En la celda superior izquierda, por ejemplo, colocamos un signo menos porque hemos *restado* 1 unidad de las 100 originales. Observe que sólo podemos utilizar celdas donde actualmente hay envíos para poder volver a la celda de partida a través de la ruta que estamos trazando. Por tanto, el camino Des Moines-Boston a Des Moines-Albuquerque a Fort Lauderdale-Albuquerque a Fort Lauderdale-Boston a Des Moines-Boston no sería aceptable, porque el recuadro Fort Lauderdale-Albuquerque está vacío. Resulta que *sólo existe un camino cerrado para cada celda vacía*. Una vez que se ha identificado este camino cerrado, podemos empezar a asignar signos más y menos a las celdas del camino.

Existe un solo camino cerrado que pueda ser trazado para cada celda no utilizada.

Paso 3. ¿Cómo decidimos qué recuadros tienen signos más y cuáles signos menos? La respuesta es sencilla. Dado que estamos probando la eficacia del coste de la ruta de envío Des Moines-Boston, intentamos enviar 1 bañera de Des Moines a Boston. Esto es 1 unidad *más* de lo que *estábamos* mandando entre las dos ciudades, por lo que hay que poner un signo más en la celda. Sin embargo, si mandamos 1 unidad más que antes de Des Moines a Boston, acabamos mandando 101 bañeras desde la fábrica de Des Moines. Como la capacidad de la fábrica de Des Moines es de sólo 100 unidades, tenemos que mandar 1 bañera menos de Des Moines a Albuquerque. Este cambio nos evita violar la restricción de capacidad.

Para indicar que hemos reducido el envío de Des Moines-Albuquerque, colocamos un signo menos en este recuadro. Continuando por el camino cerrado, observe que ya no satisfacemos el requerimiento de 300 unidades para nuestro almacén de Albuquerque. De hecho, si reducimos el

Desde \ Hasta	(A) Albuquerque	(B) Boston	(C) Cleveland	Capacidad de la fábrica
(D) Des Moines	5$ 100 −	4$	Inicio 3$ +	100
(E) Evansville	8$ 200 +	4$ − 100	3$	300
(F) Fort Lauderdale	9$	7$ + 100	5$ − 200	300
Necesidades del almacén	300	200	200	700

FIGURA C.6 ■ Prueba de Des Moines a Cleveland

envío de Des Moines-Albuquerque a 99 unidades, debemos aumentar el envío de Evansville-Albuquerque en 1 unidad hasta las 201 bañeras. Por lo tanto, se coloca un signo más en ese recuadro para indicar el aumento. También debe observar que sólo en aquellas celdas en que giramos en ángulo (y sólo en esas celdas) tendremos signos de más o menos.

Finalmente, observe que si asignamos 201 bañeras a la ruta Evansville-Albuquerque, tenemos que reducir la ruta Evansville-Boston en 1 unidad, a 99 bañeras, de forma que se mantenga la premisa de que la capacidad de la fábrica de Evansville es de 300 unidades. Para tener en cuenta esta reducción, debemos insertar un signo menos en el recuadro Evansville-Boston. Al hacer esto, hemos equilibrado las limitaciones de oferta entre las cuatro rutas del camino cerrado.

Paso 4. Se calcula un índice de mejora para la ruta Des Moines-Boston sumando los costes unitarios de los recuadros con signo más y restándoles los de los recuadros con signo menos.

Como las ciudades en las tablas están en orden aleatorio, es aceptable cruzar una celda no ocupada.

$$\text{Índice Des Moines-Boston} = 4\$ - 5\$ + 8\$ - 4\$ = +3\$$$

Esto significa que para cada bañera enviada por la ruta Des Moines-Boston, los costes totales de transporte aumentarán 3 dólares por encima de su nivel actual.

Analicemos ahora la ruta sin utilizar Des Moines-Cleveland, la cual es ligeramente más difícil de trazar con un camino cerrado (*véase* la Figura C.6). De nuevo, observe que sólo giramos por el camino en celdas de rutas existentes, es decir, recuadros que contengan envíos. Nuestro camino, por ejemplo, puede cruzar el recuadro Evansville-Cleveland, pero no puede girar en ese recuadro; por ello, no podemos poner un signo más o menos ahí. Sólo podemos utilizar las celdas ocupadas para girar:

$$\text{Índice Des Moines-Cleveland} = 3\$ - 5\$ + 8\$ - 4\$ + 7\$ - 5\$ = +4\$$$

De nuevo, la apertura de esta ruta es incapaz de reducir nuestros costes totales de envío.

Análogamente, se pueden evaluar dos rutas más:

$$\begin{aligned} \text{Índice Evansville-Cleveland} &= 3\$ - 4\$ + 7\$ - 5\$ = +\,1\$ \\ \text{(Camino cerrado} &= EC - EB + FB - FC) \\ \text{Índice Fort Lauderdale-Albuquerque} &= 9\$ - 7\$ + 4\$ - 8\$ = -\,2\$ \\ \text{(Camino cerrado} &= FA - FB + EB - EA) \end{aligned}$$

Dado que este último índice es negativo, podemos ahorrar costes utilizando la ruta Fort Lauderdale-Albuquerque (actualmente sin utilizar).

En el Ejemplo C3 vemos que es posible, en efecto, una mejor solución porque podemos calcular un índice de mejora negativo en una de nuestras rutas sin utilizar. *Cada índice negativo representa el importe en que podremos reducir los costes totales si una unidad fuese enviada por la ruta origen-destino*. El paso siguiente, por tanto, será elegir aquel itinerario (ruta sin utilizar) que tenga el índice de mejora negativo *más alto*. Entonces, podremos enviar el máximo número de unidades permitido por esa ruta y reducir el correspondiente coste total.

¿Cuál es la cantidad máxima que puede enviarse por nuestra nueva ruta de ahorro? Se hallará esa cantidad observando el camino cerrado de signos positivos y negativos trazados para esa ruta, y seleccionando después *el menor número hallado en los recuadros que contienen un signo menos*. Para obtener una nueva solución, sumamos este número a todos los recuadros del camino cerrado que tengan signo más y lo restamos de todos los recuadros del camino que tengan signo menos.

Hemos completado una iteración del método *stepping-stone*. De nuevo, por supuesto, tenemos que comprobar si la solución que ahora tenemos es óptima o si podemos hacer alguna mejora más. Esto se hace evaluando cada celda sin utilizar, tal y como se ha descrito. En el Ejemplo C4 continuamos con nuestro esfuerzo de ayudar a Arizona Plumbing a encontrar una solución final.

EJEMPLO C4

Índices de mejora

Para mejorar la solución del caso de Arizona Plumbing podemos utilizar los índices de mejora calculados en el Ejemplo C3, en el que vimos que el índice negativo más alto (y el único) está en la ruta Fort Lauderdale - Albuquerque (que es la ruta representada en la Figura C.7).

La cantidad máxima que puede enviarse en la nueva ruta abierta, Fort Lauderdale-Albuquerque (FA), es el número más bajo encontrado en los recuadros con signo menos: en este caso, 100 unidades. ¿Por qué 100 unidades? Dado que el coste total disminuye 2 dólares por unidad enviada, sabemos que nos gustaría mandar el número máximo posible de unidades. Los cálculos anteriores según el método *stepping-stone* nos indican que cada unidad enviada por la ruta FA da como resultado un aumento de 1 unidad enviada desde Evansville (E) a Boston (B) y una disminución de 1 unidad en las cantidades enviadas tanto de F a B (ahora 100 unidades) como de E a A (ahora 200 unidades). Por tanto, lo máximo que podemos mandar por la ruta FA son 100 unidades. Esta solución da como resultado cero unidades de F a B. Ahora vamos realizar los siguientes pasos:

1. Sumamos 100 unidades (a las cero que actualmente se mandan) en la ruta FA.

Desde \ Hasta	(A) Albuquerque	(B) Boston	(C) Cleveland	Capacidad de la fábrica
(D) Des Moines	5$ 100	4$	3$	100
(E) Evansville	8$ 200 −	4$ 100 +	3$	300
(F) Fort Lauderdale	9$ +	7$ 100 −	5$ 200	300
Demanda del almacén	300	200	200	700

FIGURA C.7 ■ Tabla de transporte: ruta FA

2. Restamos 100 de la ruta FB, dejando cero en esa celda (cuadrando el total de la fila F).
3. Sumamos 100 a la ruta EB, lo cual nos da 200.
4. Finalmente, restamos 100 de la ruta EA, dejando 100 unidades enviadas.

Observe, como es necesario, que los nuevos números siguen dando los totales correctos en filas y columnas. La nueva solución se muestra en la Figura C.8.

Cuando la Marina de Tailandia recluta a un mozo, debe presentarse primero al centro de reclutamiento más cercano a su residencia. Desde uno de los 36 centros, se le transporta por camión a una de las cuatro bases navales. El problema de decidir cuántos hombres deben ser asignados y transportados desde cada centro a cada base se resuelve utilizando el modelo de transporte. Cada base recibe el número de reclutas que necesita, evitándose costosos viajes adicionales.

Desde \ Hasta	(A) Albuquerque	(B) Boston	(C) Cleveland	Capacidad de la fábrica
(D) Des Moines	5$ / 100	4$	3$	100
(E) Evansville	8$ / 100	4$ / 200	3$	300
(F) Fort Lauderdale	9$ / 100	7$	5$ / 200	300
Demanda del almacén	300	200	200	700

FIGURA C.8 ■ Solución de la siguiente iteración (aún no óptima)

El coste total de distribución se ha reducido en (100 unidades) × (2 dólares ahorrados por unidad) = 200 dólares y ahora es de 4.000 dólares. Esta cifra, por supuesto, puede hallarse también multiplicando el coste de enviar cada unidad por el número de unidades transportadas por la ruta correspondiente, es decir: 100(5$) + 100(8$) + 200(4$) + 100(9$) + 200(5$) = 4.000 dólares.

Sin embargo, si observamos cuidadosamente la Figura C.8, podemos ver que todavía no es óptima. La ruta EC (Evansville-Cleveland) tiene un índice de mejora de coste negativo. Vea si puede encontrar usted mismo la solución final para esta ruta. (Los Programas C.1 y C.2, al final de este módulo, proporcionan la solución utilizando el software Excel OM).

SITUACIONES ESPECIALES EN LA MODELIZACIÓN

Demanda no igual a la oferta

Orígenes ficticios
Puntos de origen ficticios, creados en el método de transporte cuando la demanda total es mayor que la oferta total, para lograr una oferta igual al exceso de demanda total sobre la oferta total.

Destinos ficticios
Puntos de destino ficticios, creados en el método de transporte cuando la oferta total es mayor que la demanda total; sirven para igualar la demanda y oferta totales.

Una situación habitual en los problemas del mundo real es el caso en que el total de la demanda no es igual al total de la oferta. Podemos resolver fácilmente estos problemas, conocidos como “problemas desequilibrados”, con los procedimientos de resolución que acabamos de comentar introduciendo **orígenes ficticios** o **destinos ficticios**. Si la oferta total es superior a la demanda total, hacemos que la demanda sea exactamente igual al excedente creando un destino ficticio. A la inversa, si la demanda total es superior a la oferta total, introducimos un origen ficticio (fábrica) con una oferta igual al exceso de demanda. Dado que esas unidades no van a ser enviadas realmente, asignamos coeficientes de coste cero a cada celda de la ubicación ficticia. En cada caso, por tanto, el coste es cero. El Ejemplo C5 muestra cómo se utiliza un destino ficticio.

Degeneración

Para aplicar el método *stepping-stone* a un problema de transporte, debemos seguir una regla acerca del número de rutas de envío que se usan: *El número de celdas ocupadas en*

Ajuste de la diferencia entre demanda y oferta con una columna ficticia

EJEMPLO C5

Supongamos que Arizona Plumbing incrementa la producción en su fábrica de Des Moines hasta 250 bañeras, incrementando así la oferta sobre la demanda. Para volver a formular este problema desequilibrado, haremos referencia a los datos presentados en el Ejemplo C1 y mostratamos la nueva tabla en la Figura C9. Primero utilizamos la regla del rincón noroeste para hallar la solución inicial posible. Después, una vez que el problema está equilibrado, podemos proceder a la resolución de la forma normal.

Coste total = 250(5$) + 50(8$) + 200(4$) + 50(3$) + 150(5$) + 150(0$) = 3.350 dólares

Desde \ Hasta	(A) Albuquerque	(B) Boston	(C) Cleveland	Destino ficticio	Capacidad de la fábrica
(D) Des Moines	5$ 250	4$	3$	0	250
(E) Evansville	8$ 50	4$ 200	3$ 50	0	300
(F) Fort Lauderdale	9$	7$	5$ 150	0 150	300
Demanda del almacén	300	200	200	150	850

Nueva capacidad de Des Moines

FIGURA C.9 ■ Regla del rincón noroeste con destino ficticio

Archivo de datos de Excel OM ModCExC5.xla

cualquier solución (inicial o posterior) debe ser igual al número de filas en la tabla más el número de columnas menos 1. Las soluciones que no satisfacen esta regla reciben el nombre de degeneradas.

La **degeneración** se produce cuando se están utilizando muy pocas celdas o rutas de envío. Como consecuencia, resulta imposible trazar un camino cerrado para uno o más recuadros sin utilizar. El problema de Arizona Plumbing que acabamos de examinar no estaba degenerado, ya que tenía 5 rutas asignadas (3 filas o fábricas + 3 columnas o almacenes − 1).

Degeneración
Incidencia en los modelos de transporte en los que se están usando demasiado pocas celdas o rutas de envío, de manera que es imposible trazar un camino cerrado para cualquier celda no utilizada.

Para resolver los problemas de degeneración, debemos crear artificialmente una celda ocupada. Es decir, colocamos un cero o una cantidad muy pequeña (que representa un envío falso) en una de las celdas sin utilizar y luego *tratamos a esa celda como si estuviese ocupada*. Recuerde que la celda elegida debe estar en tal posición que permita que todos los caminos *stepping-stone* puedan cerrarse. Mostramos este procedimiento en el Ejemplo C6.

Resolución de la degeneración

EJEMPLO C6

Martin Shipping Company tiene tres almacenes desde los que abastece a sus tres principales clientes de venta al detalle en San José. Los costes de envío de Martin, las capacidades de suministro de los almacenes y las demandas de los clientes se presentan en la tabla de transporte de la

Compruebe el número de celdas sin utilizar para asegurarse de que el número de filas + número de columnas – 1 es igual al número de celdas ocupadas.

Figura C.10. Para hacer las asignaciones de envío iniciales en esa tabla, aplicamos la regla del rincón noroeste.

La solución inicial es degenerada porque incumple la regla de que el número de celdas utilizadas debe ser igual al número de filas más el número de columnas menos 1. Para corregir el problema, podemos colocar un cero en la celda sin utilizar que permite la evaluación de todas las celdas vacías. Podría ser necesario realizar varios intentos puesto que no todas las celdas van a permitir el trazado de un camino cerrado para las celdas restantes. Asimismo, queremos evitar colocar el 0 en una celda que tiene un signo negativo en un camino cerrado. Si lo hiciéramos, no sería posible la reasignación.

Para este ejemplo, probamos con la casilla vacía que representa la ruta entre el almacén 2 y el cliente 1. Ahora podemos cerrar todos los caminos *stepping-stone* y calcular los índices de mejora.



Desde \ Hasta	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Oferta del almacén
Almacén 1	8$ / 100	2$	6$	100
Almacén 2	10$ / 0	9$ / 100	9$ / 20	120
Almacén 3	7$	10$	7$ / 80	80
Demanda del cliente	100	100	100	300

FIGURA C.10 ■ La regla del rincón noroeste para Martin Shipping Company

RESUMEN

El modelo de transporte, una forma de programación lineal, se utiliza para ayudar a encontrar las soluciones de menor coste para los problemas de distribución en el conjunto de un sistema. Puede utilizarse el método del rincón noroeste (que empieza en la celda superior izquierda de la tabla de transporte) o el método intuitivo del menor coste para encontrar una solución inicial factible. Después recurrimos al algoritmo *stepping-stone* para hallar la solución óptima. Los problemas desequilibrados son aquellos en que la demanda total y la oferta total no son iguales. La degeneración se refiere al caso en que el número de filas + el número de columnas − 1 no es igual al número de celdas ocupadas. El enfoque del modelo de transporte es uno de los cuatro modelos de localización descritos en el Capítulo 8 del volumen *Decisiones Estratégicas*. Se presentan algunas técnicas adicionales de resolución en su CD, en el Tutorial 4.



Modelización del transporte *(p. 376)*
Regla del rincón noroeste *(p. 378)*
Método intuitivo *(p. 379)*
Método *stepping-stone (p. 380)*
Orígenes ficticios *(p. 384)*
Destinos ficticios *(p. 384)*
Degeneración *(p. 385)*

CÓMO UTILIZAR EL SOFTWARE PARA RESOLVER PROBLEMAS DE TRANSPORTE

Se pueden utilizar tanto Excel como Excel OM y POM para Windows para resolver problemas de transporte. Excel utilizar la herramienta Solver, que exige que usted introduzca sus propias restricciones. Excel OM también utiliza Solver, pero tiene una estructura predefinida que permite introducir únicamente los datos. POM para Windows también requiere introducir únicamente los datos de demanda, oferta y costes de envío.



Cómo utilizar Excel OM

El módulo de transporte de Excel OM utiliza la rutina *Solver* incluida en Excel para hallar soluciones óptimas a los problemas de transporte. El Programa C.1 muestra los datos de entrada (de Arizona Plumbing) y las fórmulas de costes totales. Para alcanzar una solución óptima, debemos ir a la barra *Tools* (*Herramientas*) de Excel, seleccionar *Solver* y después *Solve* (*Solucionar*). Los datos de salida aparecen en el Programa C.2.

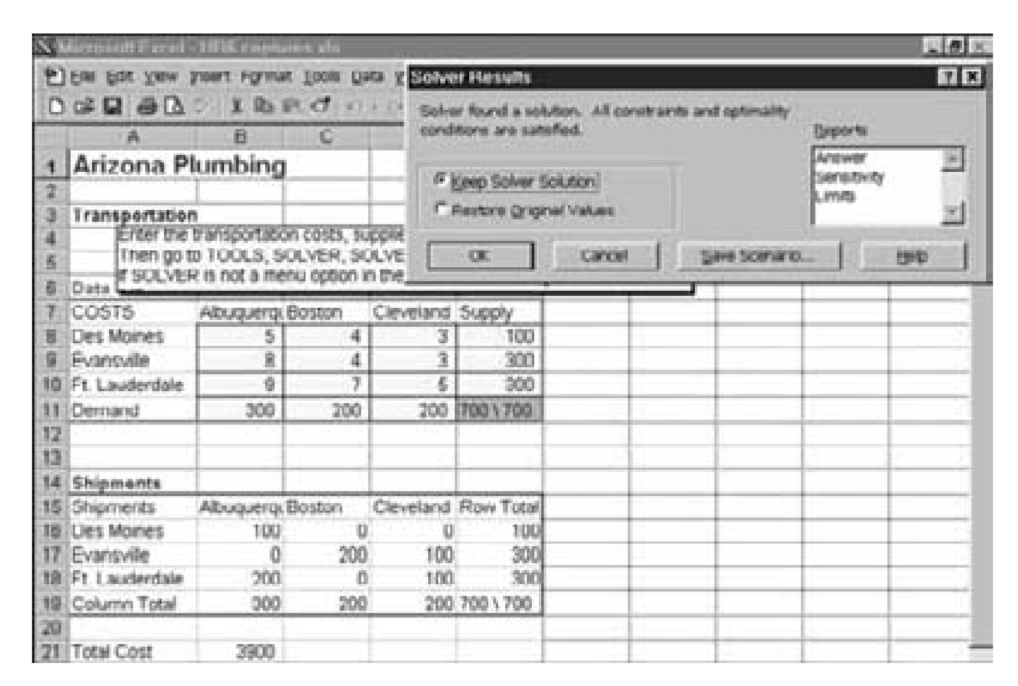


PROGRAMA C.1 ■ Pantalla de datos de entrada y fórmulas de Excel OM, utilizando los datos de Arizona Plumbing



Cómo utilizar POM para Windows para resolver problemas de transporte

El módulo de transporte de POM para Windows puede resolver tanto los problemas de maximización como los de minimización mediante diversos métodos. Los datos de entra-



PROGRAMA C.2 ■ Datos de salida de Excel OM con la solución óptima del problema de Arizona Plumbing

da son los datos de demanda, los datos de oferta y los costes unitarios de envío. *Véase* el Apéndice IV para más detalles.

PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto C.1

Williams Auto Top Carriers tiene actualmente plantas en Atlanta y Tulsa que suministran portaequipajes para automóviles a los centros de distribución de Los Ángeles y Nueva York. Dada la expansión de la demanda, Williams ha decidido abrir una tercera fábrica y ha limitado su elección a una de las dos ciudades siguientes: Nueva Orleans y Houston. La Tabla C.3

TABLA C.3 ■ Costes de producción, costes de distribución, capacidades de las plantas y demandas de mercado para Williams Auto Top Carriers

	A los centros de distribución			
Desde las fábricas	Los Ángeles	Nueva York	Producción normal	Coste unitario de producción
Plantas existentes				
Atlanta	8$	5$	600	6$
Tulsa	4$	7$	900	5$
Localizaciones propuestas				
Nueva Orleans	5$	6$	500	4$ (previsto)
Houston	4$	6$[a]	500	3$ (previsto)
Demanda prevista	800	1.200	2.000	

[a] Indica que los costes de distribución (envío, manipulación, almacenamiento) serán de 6 dólares por portaequipajes entre Houston y Nueva York

proporciona los costes de producción y distribución así como las capacidades de las plantas y las demandas de distribución.

¿Cuál de las dos nuevas localizaciones posibles, en combinación con las plantas y centros de distribución existentes, proporcionará el menor coste para la empresa?

Solución

Para responder a esta pregunta, debemos resolver dos problemas de transporte, uno para cada combinación. Recomendaremos la localización que proporcione un menor coste de distribución y producción, en combinación con el sistema existente.

Empezamos con la elaboración de una tabla de transporte que represente la apertura de una tercera planta en Nueva Orleans (*véase* la Figura C.11). Después aplicamos la regla del rincón noroeste para hallar una solución inicial. El coste total de la primera solución es de 23.600 dólares. Observe que el coste de cada ruta de "fábrica a centro de distribución" se halla sumando los costes de distribución (en el cuerpo de la tabla C.3) a los correspondientes costes unitarios de producción (en la columna de la derecha de la Tabla C.3). Así pues, el coste total de producción más el coste de distribución de cada portaequipaje desde Atlanta hasta Los Ángeles es de 14 dólares (8 dólares de envío más 6 dólares de producción).

Coste total = (600 unidades × 14$) + (200 unidades × 9$) + (700 unidades × 12$) + (500 unidades × 10$)
= 8.400$ + 1.800$ + 8.400$ + 5.000$ = 23.600$

¿Es óptima esta solución inicial? Podemos utilizar el método del *stepping-stone* para comprobarlo y calcular los índices de mejora para las rutas sin utilizar.

Índice de mejora para la ruta Atlanta-Nueva York

= +11$ (Atlanta-Nueva York)
− 14$ (Atlanta-Los Ángeles)
+ 9$ (Tulsa-Los Ángeles)
− 12$ (Tulsa-Nueva York)
= −6$

Índice de mejora para la ruta Nueva Orleans-Los Ángeles

= + 9$ (N. Orleans-Los Ángeles)
− 10$ (N. Orleans-N. York)
+ 12$ (Tulsa-N. York)
− 9$ (Tulsa-Los Ángeles)
= 2$

Dado que la empresa puede ahorrar 6 dólares por cada unidad enviada de Atlanta a Nueva York, querrá mejorar la solución inicial y mandar tantas unidades como le sea posible (600 en este caso) por esta ruta actualmente sin utilizar (*véase* la Figura C.12). Usted también puede observar que el coste total es ahora de 20.000 dólares, con un ahorro de 3.600 dólares sobre la solución inicial.

Ahora tenemos que comprobar si los índices de mejora de las dos rutas sin utilizar también son negativos:

Índice para Atlanta-Los Ángeles

= 14$ − 11$ + 12$ − 9$ = 6$

Desde \ Hasta	Los Ángeles	Nueva York	Capacidad de producción
Atlanta	14$ 600	11$	600
Tulsa	9$ 200	12$ 700	900
Nueva Orleans	9$	10$ 500	500
Demanda	800	1.200	2.000

FIGURA C.11 ■ Tabla de transporte inicial de Williams para Nueva Orleans

Desde \ Hasta	Los Ángeles	Nueva York	Capacidad de producción
Atlanta	14$	11$ 600	600
Tulsa	9$ 800	12$ 100	900
New Orleans	9$	10$ 500	500
Demanda	800	1.200	2.000

FIGURA C.12 ■ Tabla de transporte mejorada para Williams

Índice para N. Orleans-Los Ángeles

$$= 9\$ - 10\$ + 12\$ - 9\$ = 2\$$$

Dado que ambos índices son superiores a cero, ya hemos alcanzado nuestra solución óptima utilizando la fábrica de Nueva Orleans. Si Williams decide abrir la planta de Nueva Orleans, los costes totales de producción y distribución serán de 20.000 dólares.

Este análisis, sin embargo, proporciona sólo la mitad de la respuesta al problema de Williams. Debemos seguir el mismo procedimiento para determinar el mínimo coste si la nueva planta se construye en Houston. El cálculo de este coste se deja como tarea pendiente a realizar por el alumno. Usted puede proporcionar la información completa y recomendar una solución resolviendo el Problema C.8.

Problema Resuelto C.2

En el Problema Resuelto C.1, analizamos el problema de Williams Auto Top Carriers utilizando una tabla de transporte. Un enfoque alternativo podría ser estructurar el mismo análisis de decisión utilizando la programación lineal, que explicamos en detalle en el Módulo Cuantitativo B.

Solución

Con los datos de la Figura C.11, escribimos la función objetiva y las restricciones como sigue:

Minimizar el coste total $= 14\$X_{\text{Atl,LA}} + 11\$X_{\text{Atl,NY}} + 9\$X_{\text{Tul,LA}} + 12\$X_{\text{Tul,NY}} + 9\$X_{\text{NO,LA}} + 10X_{\text{NO,NY}}$

Sujeto a:

$X_{\text{Atl,LA}} + X_{\text{Atl,NY}} \leq 600$ (capacidad de producción en Atlanta)

$X_{\text{Tul,LA}} + X_{\text{Tul,NY}} \leq 900$ (capacidad de producción en Tulsa)

$X_{\text{NO,LA}} + X_{\text{NO,NY}} \leq 500$ (capacidad de producción en Nueva Orleans)

$X_{\text{Atl,LA}} + X_{\text{Tul,LA}} + X_{\text{NO,LA}} \geq 800$ (premisa de demanda en Los Ángeles)

$X_{\text{Atl,NY}} + X_{\text{Tul,NY}} + X_{\text{NO,NY}} \geq 1.200$ (premisa de demanda en Nueva York)

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.

 En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Problemas en Internet
- Casos de estudio en Internet

 **En su CD-ROM del alumno**

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Excel OM
- Archivo de datos para el ejemplo de Excel OM
- POM para Windows



CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. ¿Cuáles son las tres informaciones necesarias en el modelo de transporte?
2. ¿Qué pasos sigue el método intuitivo del menor coste?
3. Identifique los tres pasos de la regla del rincón noroeste.
4. ¿Cómo sabe que ha alcanzado una solución óptima?
5. ¿Qué técnica de partida suele dar una mejor solución inicial, y por qué?
6. Cuantos más orígenes y destinos haya en un problema de transporte, menor será el porcentaje sobre el total de celdas que se utilizará en la solución óptima. Explique esta afirmación.
7. Todos los ejemplos de transporte parecen aplicarse a largas distancias. ¿Es posible aplicar el modelo de transporte a una escala mucho menor, por ejemplo, entre los departamentos de un centro comercial o en las oficinas de un edificio? Razone la respuesta; cree un ejemplo o demuestre que la aplicación es imposible.
8. Desarrolle la regla del rincón *noroeste* y explique cómo funcionaría. Halle una solución inicial para el problema de Arizona Plumbing analizado en el Ejemplo C.1.
9. ¿Qué quiere decir que un problema de transporte está desequilibrado, y cómo puede equilibrarlo?
10. ¿Cuántas celdas tienen que utilizar todas las soluciones?
11. Explique la importancia de un índice de mejora negativo en un problema de transporte de minimización.
12. ¿Cómo puede tener en cuenta el método de transporte los costes de producción además de los costes de transporte?
13. Explique qué se quiere decir con *degeneración* en el contexto del modelo de transporte.

PROBLEMAS*

•  **C.1.** Halle una solución inicial al siguiente problema de transporte.

a) Utilizando el método del rincón noroeste.
b) Utilizando el enfoque intuitivo del menor coste.
c) ¿Cuál es el coste total de cada método?

---

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows;  significa que se puede resolver el problema con Excel OM; **P** significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

	Hasta			
Desde	**Los Ángeles**	**Calgary**	**Ciudad de Panamá**	**Oferta**
Ciudad de México	6 $	18 $	8 $	100
Detroit	17 $	13 $	19 $	60
Ottawa	20 $	10 $	24 $	40
Demanda	50	80	70	

• P **C.2.** Utilizando el método *stepping-stone*, halle la solución óptima al Problema C.1. Calcule el coste total.

• P **C.3.** **a)** Utilice el método del rincón noroeste para hallar una solución inicial posible al siguiente problema. ¿Qué debe hacer antes de empezar a buscar la solución?
b) Utilice el método intuitivo del menor coste para hallar una solución inicial factible. ¿Cuál es la mejor?

	Hasta			
Desde	**A**	**B**	**C**	**Oferta**
X	10 $	18 $	12 $	100
Y	17 $	13 $	9 $	50
Z	20 $	18 $	14 $	75
Demanda	50	80	70	

• P **C.4.** Halle la solución óptima al Problema C.3 utilizando el método *stepping-stone*.

: P **C.5.** Tharp Air Conditioning fabrica sistemas de aire acondicionado en sus fábricas de Houston, Phoenix y Memphis. Éstos se envían a distribuidores regionales de Dallas, Atlanta y Denver. Los costes de envío varían y la empresa quiere encontrar la manera más barata de satisfacer las demandas de cada centro de distribución. Dallas necesita recibir 800 aparatos de aire acondicionado al mes, Atlanta necesita 600 y Denver 200. Houston tiene 850 aparatos disponibles cada mes, Phoenix tiene 650 y Memphis tiene 300. El coste de envío por unidad de Houston a Dallas es de 8 dólares, a Atlanta de 12 y a Denver de 10. El coste unitario de Phoenix a Dallas es de 10 dólares, a Atlanta de 14 y a Denver de 9. El coste unitario de Memphis a Dallas es de 11 dólares, a Atlanta de 8 y a Denver de 12. ¿Cuántas unidades debe enviar la propietaria Devorah Tharp desde cada planta a cada centro de distribución regional? ¿Cuál es el coste total de transporte? (Observe que se necesita un destino "ficticio" para equilibrar el problema).

: P **C.6.** La siguiente tabla es el resultado de una o más iteraciones:

a) Complete la siguiente iteración utilizando el método *stepping-stone*.
b) Calcule el "coste total" si sus resultados tuviesen que ser aceptados como solución final.

Desde \ Hasta	1	2	3	Capacidad
A	30 40	30	5 10	50
B	10	10 30	10	30
C	20	10 30	25 45	75
Demanda	40	60	55	155

C.7. Los tres bancos de sangre del condado de Franklin están coordinados mediante una oficina central que facilita el suministro de sangre a los cuatro hospitales de la región. El coste de enviar un recipiente estándar de sangre de cada banco a cada hospital aparece en la siguiente tabla. También se ofrecen el número de recipientes disponibles quincenalmente en cada banco y el número de recipientes de sangre que se necesitan quincenalmente en cada hospital. ¿Cuántos envíos deben realizarse quincenalmente de cada banco de sangre a cada hospital de forma que se minimicen los costes de envío?

	Hasta				
Desde	**Hosp. 1**	**Hosp. 2**	**Hosp. 3**	**Hosp. 4**	**Oferta**
Banco 1	8$	9$	11$	16$	50
Banco 2	12$	7$	5$	8$	80
Banco 3	14$	10$	6$	7$	120
Demanda	90	70	40	50	250

C.8. En el Problema Resuelto C.1, Williams Auto Top Carriers proponía abrir una nueva planta en Nueva Orleans o en Houston. La dirección halló que el coste total en el sistema (de la producción más la distribución) sería de 20.000 dólares para la ubicación de Nueva Orleans. ¿Cuál sería el coste total si Williams abriese una planta en Houston? ¿En cuál de las dos localizaciones propuestas (Nueva Orleans o Houston) debería Williams abrir la nueva instalación?

C.9. Para los siguientes datos de Karen-Reifsteck Corp., calcule la solución inicial y su coste utilizando el método del rincón noroeste. ¿Qué tiene que hacer para equilibrar este problema?

	Hasta				
Desde	**W**	**X**	**Y**	**Z**	**Oferta**
A	132$	116$	250$	110$	220
B	220$	230$	180$	178$	300
C	152$	173$	196$	164$	435
Demanda	160	120	200	230	

C.10. Tara Tripp Clothing Group tiene plantas de producción en tres localidades (W, Y y Z), que distribuyen a tres tiendas Walsh de venta al detalle de ropa en otras tres ciudades (A, B y C). La siguiente tabla resume las disponibilidades de las factorías, las demandas previstas de las tiendas y los costes unitarios de envío:

Walsh Clothing Group

Desde \ Hasta	Tienda A	Tienda B	Tienda C	Disponibilidad de fábrica
Fábrica W	4$	3$	3$	35
Fábrica Y	6$	7$	6$	50
Fábrica Z	8$	2$	5$	50
Demanda de la tienda	30	65	40	135

a) Complete el análisis, determinando la solución óptima de distribución para Tara Tripp Corbin Clothing Group.
b) ¿Cómo sabe si es óptima o no?

C.11. Analice el siguiente problema de transporte de Frank Timoney Enterprises en Clifton Park, NY.

	Hasta			
Desde	**Destino A**	**Destino B**	**Destino C**	**Oferta**
Origen 1	8$	9$	4$	72
Origen 2	5$	6$	8$	38
Origen 3	7$	9$	6$	46
Origen 4	5$	3$	7$	19
Demanda	110	34	31	175

a) Halle la solución inicial utilizando la regla del rincón noroeste. ¿Qué condición especial existe?
b) Explique qué haría para resolver el problema.
c) ¿Cuál es la solución óptima?

C.12. Bell Mill Works (BMW) suministra puertas a tres almacenes de materiales para la construcción desde sus serrerías de Mountpelier, Nixon y Oak Ridge. Determine el mejor plan de envíos para BMW a partir de los datos proporcionados por Kelly Bell, directora de tráfico de BMW. Utilice como procedimiento inicial el rincón noroeste y a continuación el método *stepping-stone*. Vea la siguiente tabla para los datos. (*Nota*: Podría encontrarse con una solución degenerada en una de sus iteraciones).

Bell Mill Works

Desde \ Hasta	Almacén de materiales 1	Almacén de materiales 2	Almacén de materiales 3	Capacidad de la serrería (en toneladas)
Mountpelier	3$	3$	2$	25
Nixon	4$	2$	3$	40
Oak Ridge	3$	2$	3$	30
Demanda de la tienda de materiales (en toneladas)	30	30	35	95

C.13. Captain Cabell Corp. fabrica equipos de pesca. Actualmente la empresa tiene una planta de fabricación en Los Ángeles y otra en Nueva Orleans. David Cabell, propietario de la empresa, está decidiendo dónde debe construir una nueva planta, en Filadelfia o en Seattle. Utilice la siguiente tabla para calcular los costes totales de distribución para cada una de las plantas posibles. ¿Cuál debe elegir Cabell?

	Almacén			
Fábrica	**Pittsburgh**	**St. Louis**	**Denver**	**Capacidad**
Los Ángeles	100$	75$	50$	150
Nueva Orleans	80$	60$	90$	225
Filadelfia	40$	50$	90$	350
Seattle	110$	70$	30$	350
Demanda	200	100	400	

C.14. Susan Helms Manufacturing Co. le ha contratado para evaluar sus costes de distribución. La siguiente tabla muestra la demanda actual, la capacidad y los costes de envío entre cada factoría y cada almacén. Determine el patrón de envío más económico.

Datos de Susan Helms Manufacturing

Desde \ Hasta	Almacén 1	Almacén 2	Almacén 3	Almacén 4	Capacidad de la fábrica
Fábrica 1	4	7	10	12	2.000
Fábrica 2	7	5	8	11	2.500
Fábrica 3	9	8	6	9	2.200
Demanda del almacén	1.000	2.000	2.000	1.200	6.700 / 6.200

C.15. Drew Rosen Corp. está pensando añadir una cuarta planta a sus tres instalaciones actualmente existentes en Decatur, Minneapolis y Carbondale. St. Louis y East St. Louis están siendo consideradas como posibles localizaciones. Evaluando sólo los costes de transporte por unidad, tal y como se muestran en la tabla, decida qué ubicación es la mejor.

	Desde las fábricas actuales			
Hasta	**Decatur**	**Minneapolis**	**Carbondale**	**Demanda**
Blue Earth	20$	17$	21$	250
Ciro	25$	27$	20$	200
Des Moines	22$	25$	22$	350
Capacidad	300	200	150	

	Desde las fábricas propuestas	
Hasta	**East St. Louis**	**St. Louis**
Blue Earth	29$	27$
Ciro	30$	28$
Des Moines	30$	31$
Capacidad	150	150

C.16. Utilizando los datos del Problema C.15 y los costes unitarios de producción de la siguiente tabla, indique qué localizaciones proporcionan el menor coste.

Localización	Costes de producción ($)
Decatur	50$
Minneapolis	60
Carbondale	70
East St. Louis	40
St. Louis	50

C.17. Duffy Pharmaceuticals disfruta de una posición dominante en el sudeste de Estados Unidos, con más de 800 tiendas al por menor. Estas tiendas son abastecidas por dos entregas por semana, desde los 16 almacenes de Duffy, que a su vez se abastecen diariamente de siete fábricas que manufacturan alrededor del 70 por ciento de todos los productos de la empresa.

Para Toffany Wendt, vicepresidenta de operaciones, es evidente que la empresa necesita urgentemente un almacén adicional poder hacer frente al crecimiento en la demanda y a los pedidos atrasados. Tres ciudades, Mobile, Tampa y Huntsville, se están teniendo en cuenta como posibles localizaciones. La siguiente tabla muestra las demandas y capacidades de las fábricas y los almacenes, actuales y propuestos, así como los costes de distribución por cada caja media de productos.

a) Basándose sólo en los costes de envío, ¿qué ciudad debería seleccionarse para el nuevo almacén?

b) Un estudio plantea que la capacidad de Ocala puede aumentar a 500 cajas al día. ¿Esto afectaría a su decisión del apartado a)?

c) Gracias a un nuevo acuerdo de transporte interestatal del Estado, las tarifas para distribuir desde cualquier factoría de Florida a cualquier almacén del mismo estado, dis-

minuyen un dólar por caja. ¿En qué medida afecta esto a su decisión de los apartados a) y b)?

Tabla del Problema C.17

Factoría	Almacén: Atlanta, GA	Nueva Orleans, LA	Jackson, MS	Birmingham, AL	Montgomery, AL	Raleigh, NC	Asheville, NC	Columbia, SC	Capacidad (cajas/día)
Valdosta, GA	3$	5$	4$	3$	4$	6$	8$	8$	500
Ocala, FL	4	6	5	5	6	7	6	7	300
Augusta, GA	1	4	3	2	2	6	7	8	400
Stuart, FL	3	5	2	6	6	5	5	6	200
Biloxi, MS	4	1	4	3	3	8	9	10	600
Starkville, MS	3	3	1	2	2	6	5	6	400
Durham, NC	4	8	8	7	7	2	2	2	500
Necesidades (cajas/día)	150	250	50	150	100	200	150	300	

Factoría	Almacén: Orlando, FL	Miami, FL	Jacksonville, FL	Wilmington, NC	Charlotte, NC	Mobile, AL	Tampa, FL	Huntsville, AL	Capacidad (cajas/día)
Valdosta, GA	9$	10$	8$	8$	11$	4$	6$	3$	500
Ocala, FL	2	3	2	6	7	5	2	5	300
Augusta, GA	7	9	6	8	9	3	5	2	400
Stuart, FL	2	2	3	5	5	6	3	5	200
Biloxi, MS	7	13	9	8	8	2	6	3	600
Starkville, MS	6	8	7	7	8	3	6	2	400
Durham, NC	6	8	5	1	2	8	7	8	500
Necesidades (cajas/día)	250	300	300	100	150	300	300	300	



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: C.18 a C.22.

Caso de estudio

Custom Vans, Inc.

Custom Vans, Inc., está especializada en convertir furgonetas normales en autocaravanas. Según la cantidad y tipo de trabajo a realizar, la personalización podría costar desde menos de 1.000 dólares hasta 5.000 dólares. En menos de 4 años, Tony Rizzo pudo ampliar su pequeño negocio en Gary (Indiana) a otras mayores

instalaciones en Chicago, Milwaukee, Minneapolis y Detroit.

La innovación fue el factor más importante del éxito de Tony a la hora de convertir una pequeña tienda de furgonetas en una de las mayores y más rentables empresas de personalización de furgonetas del medio oeste. Tony parecía tener una habilidad especial para diseñar y desarrollar características y dispositivos únicos que siempre tenían mucha demanda entre los propietarios de furgonetas. Un ejemplo es la ducha Shower-Rific, que fue desarrollada por Tony sólo 6 meses después de empezar con Custom Vans, Inc. Estas pequeñas duchas son completamente independientes y pueden colocarse en casi cualquier tipo de furgoneta y en muchos lugares distintos dentro de la furgoneta. Shower-Rific está fabricada con fibra de vidrio, dispone de toalleros, compartimentos para jabón y champú, y una puerta de plástico exclusiva. Cada Shower-Rific necesita unos 8 litros de fibra de vidrio y 3 horas de mano de obra para su fabricación.

La mayoría de las Shower-Rifics se fabrican en Gary, en el mismo almacén en que se fundó la empresa Custom Vans, Inc. La planta de fabricación de Gary puede producir 300 Shower-Rifics en un mes, pero esta capacidad nunca parece ser suficiente. Las tiendas de Custom Vans en todas partes se quejan de no recibir suficientes Shower-Rifics, y dado que Minneapolis está más lejos de Gary que el resto de las localizaciones, Tony siempre tiende a enviar Shower-Rifics a los demás sitios, antes que a Minneapolis. Esto saca de quicio al director de Custom Vans en Minneapolis, y después de muchas acaloradas discusiones, Tony ha decidido instalar una nueva planta de fabricación de Shower-Rifics en Fort Wayne (Indiana). La planta de Fort Wayne podría producir 150 Shower-Rifics al mes.

La planta de fabricación de Fort Wayne aún no podía satisfacer la demanda actual de Shower-Rifics, y Tony sabía que la demanda de su exclusiva ducha para autocaravana aumentaría rápidamente en el próximo año. Tras consultarlo con su banco y con su abogado, Tony llegó a la conclusión de que debía abrir dos nuevas plantas lo antes posible. Cada una tendría la misma capacidad que la de Fort Wayne. Se llevó a cabo una investigación inicial sobre localizaciones posibles para las plantas, y Tony decidió que las dos nuevas plantas deberían situarse en Detroit (Michigan), Rockford (Illinois) o Madison (Wisconsin). Tony sabía que seleccionar la mejor localización para las dos nuevas plantas sería difícil. Los costes de transporte y las demandas de las diferentes localizaciones serían importantes factores a tener en cuenta.

La tienda de Chicago estaba dirigida por Bill Burch. Esta tienda fue una de las primeras que abrió Tony, y continuaba dando mejores resultados que las demás. La planta de fabricación de Gary estaba suministrando 200 Shower-Rifics al mes, aunque Bill sabía que la demanda de duchas en Chicago era de 300 unidades. El coste de transporte por unidad desde Gary ascendía a 10 dólares, y aunque el coste de transporte desde Fort Wayne era el doble de ese importe, Bill siempre estaba rogando a Tony que le mandase 50 unidades más de la planta de Fort Wayne. Las dos plantas suplementarias serían capaces ciertamente de suministrar a Bill las 100 duchas que necesitaba. Los costes de transporte, por supuesto, podrían variar, según la localización que Tony eligiera. El coste de transporte por cada ducha sería de 30 dólares desde Detroit, 5 desde Rockford y 10 dólares desde Madison.

Wilma Jackson, directora de la tienda de Custom Van en Milwaukee, era la que estaba más disgustada con el hecho de no recibir un suministro adecuado de duchas. Tenía una demanda de 100 unidades y de momento sólo recibíaba la mitad de esta demanda desde la planta de Fort Wayne. No podía comprender por qué Tony no le enviaba la totalidad de las 100 unidades desde Gary. El coste de transporte desde Gary era sólo de 20 dólares, mientras que desde Fort Wayne era de 30 dólares. Wilma confiaba en que Tony seleccionase Madison para una de las localizaciones de las plantas. Podría conseguir todas las duchas que necesitara, y el coste unitario de transporte sería sólo de 5 dólares. Si no fuera en Madison, una nueva planta en Rockford podría suministrarle todas sus necesidades, pero el coste de transporte por unidad sería el doble que desde Madison. Como el coste de transporte desde Detroit sería de 40 dólares, Wilma calculaba que, aunque Detroit fuese una de las nuevas plantas, no recibiría unidad alguna desde Detroit.

Custom Vans, Inc. de Minneapolis estaba dirigida por Tom Poanski. Recibía 100 duchas desde la planta de Gary. La demanda ascendía a 150 unidades. Tom hacía frente a los más altos costes de transporte de todas las localizaciones. El coste de transporte desde Gary era de 40 dólares por unidad. Le costaría 10

dólares más si las duchas se enviasen desde la localización de Fort Wayne. Tom estaba esperando que Detroit no fuera una de las nuevas plantas, puesto que los costes de transporte serían de 60 dólares por unidad. Rockford y Madison tendrían un coste de 30 y 25 dólares, respectivamente, para cada ducha enviada a Minneapolis.

La posición de la tienda de Detroit era similar a la de Milwaukee: sólo recibía la mitad de la demanda mensual. Las 100 unidades que recibía Detroit venían directamente desde la planta de Fort Wayne. El coste de transporte era sólo de 15 dólares por unidad desde Fort Wayne, mientras que desde Gary ascendía a 25 dólares. Dick Lopez, director de Custom Vans, Inc. de Detroit, situaba muy alta la probabilidad de tener una de las nuevas plantas en Detroit. La planta estaría al otro lado de la ciudad y el coste de transporte sería sólo de 5 dólares por unidad. Podría recibir 150 duchas desde la nueva planta de Detroit y las otras 50 desde Fort Wayne. Incluso si no se seleccionara Detroit, las otras dos localizaciones podrían admitirse desde el punto de vista de costes. Rockford tendría un coste de transporte por unidad de 35 dólares, y Madison de 40.

Tony reflexionó sobre el problema de la localización de las dos nuevas plantas durante varias semanas antes de decidirse a convocar una reunión de todos los directores de las tiendas. La decisión era complicada, pero el objetivo estaba claro: minimizar los costes totales. La reunión se celebró en Gary, y todo el mundo estaba `presente, excepto Wilma.

Tony: Gracias por venir. Como sabéis, he decidido abrir dos nuevas plantas en Rockford, Madison, o en Detroit. Las dos localizaciones, por supuesto, cambiarán nuestras prácticas de envíos, y espero sinceramente que os suministren todas las Shower-Rifics que habéis estado esperando. Sé que podríais haber vendido más unidades, y quiero que sepáis que lamento esta situación.

Dick: Tony, he pensado mucho en esta situación, y creo sinceramente que al menos una de las nuevas plantas debería ubicarse en Detroit. Como sabes, actualmente estoy recibiendo sólo la mitad de las duchas que necesito. Mi hermano Leon tiene mucho interés en dirigir la planta, y sé que lo haría bien.

Tom: Dick, estoy convencido de que Leon lo haría estupendamente, y sé lo difícil que ha sido desde los recientes despidos de la industria automovilística. De todos modos, deberíamos atender a los costes totales y no personalizar. Creo que las nuevas plantas deberían estar en Madison y Rockford. Estoy más lejos de las otras plantas que cualquier otra tienda, y estas localizaciones reducirían sustancialmente los costes de transporte.

Dick: Puede que sea cierto, pero hay otros factores. Detroit tiene uno de los mayores proveedores de fibra de vidrio, y he comprobado los precios. Una nueva planta en Detroit podría comprar fibra de vidrio por 2 dólares menos por galón (4 litros) que cualquiera de las otras plantas existentes o proyectadas.

Tom: En Madison tenemos una excelente mano de obra. Esto se debe principalmente al número de estudiantes de la Universidad de Madison. Estos estudiantes son buenos trabajadores y trabajarían por 1 dólar menos a la hora que las demás localizaciones que estamos considerando.

Bill: Tranquilizaos los dos. Es evidente que no vamos a poder satisfacer a todo el mundo al localizar las nuevas plantas. Por tanto, me gustaría sugerir que votemos sobre las dos ubicaciones que nos parezcan mejores.

Tony: No creo que una votación sea una buena idea. Wilma no ha podido venir, y tendríamos que considerar todos estos factores en conjunto de alguna forma lógica.

Pregunta para el debate

¿Dónde localizaría las dos nuevas plantas? ¿Por qué?

Fuente: *Managerial Decision Modeling with Spreadsheets,* de B. Render, R. M. Stair, y R. Balakrishnan, 2.ª ed. Copyrigth @ 2006. Reimpreso con permiso de Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Visite nuestra página personal www.prenhall.com/heizer para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Consolidated Bottling (B):** Este caso trata de determinar dónde se debe incrementar la capacidad de embotellado.
- **Northwest General Hospital:** Este caso trata de minimizar el tiempo para distribuir la comida caliente en un hospital.



BIBLIOGRAFÍA

Drezner, Z. *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*. Secaucus, NJ: Springer-Verlag (1995).

Haksever, C., B. Render, y R. Russell. *Service Management and Operations*, 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2000).

Koksalan, M., y H. Sural. "Efes Beverage Group Makes Location and Distribution Decisions for Its Malt Plants". *Interfaces* 29 (marzo-abril 1999): pp. 89-103.

Ping, J., y K. F. Chu. "A Dual-Matrix Approach to the Transportation Problem". *Asia–Pacific Journal of Operations Research* 19 (mayo 2002): pp. 35-46.

Render, B., R. M. Stair, y R. Balakrishnan. *Managerial Decision Modeling with Spreadsheets*. 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Render, B., R. M. Stair, y M. Hanna. *Quantitative Analysis for Management*, 9.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Schmenner, R. W. "Look Beyond the Obvious in Plant Location". *Harvard Business Review* 57, 1 (enero-febrero 1979): pp. 126-132.

Taylor, B. *Introduction to Management Science*, 8.ª ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2005).

MÓDULO CUANTITATIVO D

MODELOS DE COLAS (LÍNEAS DE ESPERA)

CONTENIDO DEL MÓDULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando acabe este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

Las hipótesis de los cuatro modelos básicos de colas de espera

Describir o explicar:

Cómo aplicar los modelos de colas

Cómo hacer un análisis económico de las colas

Teoría de colas
Cuerpo de conocimientos sobre las líneas de espera (colas).

Línea de espera (cola)
Artículos o personas en una cola, a la espera de un servicio.

El cuerpo de conocimientos sobre las líneas de espera, a menudo llamado **teoría de colas**, es una parte importante de las operaciones y una valiosa herramienta para el director de operaciones. Las **líneas de espera** son una situación corriente. Pueden, por ejemplo, tomar la forma de automóviles que esperan una reparación en un taller de tubos de escape Midas, de trabajos para fotocopiar a la espera de ser realizados en una de las tiendas de la cadena Kinko, o turistas esperando a entrar en la atracción de Mr. Toad en Disney. La Tabla D1 enumera algunas utilizaciones de los modelos de colas en la Dirección de Operaciones.

TABLA D.1 ■ Situaciones habituales de colas

Situación	Llegadas a la cola	Proceso de servicio
Supermercado	Clientes con la compra	Cobro por los cajeros en las cajas
Cabina de peaje en autopista	Automóviles	Cobro de peajes en las cabinas
Consulta del médico	Pacientes	Tratamiento de médicos y enfermeras
Sistema de computadora	Programas a ejecutar	Proceso de los trabajos en la computadora
Compañía telefónica	Usuarios que llaman	Equipos de conmutación gestionan las llamadas
Banco	Clientes	Transacciones realizadas por los cajeros
Mantenimiento de máquinas	Máquinas averiadas	Personal de mantenimiento repara las máquinas
Puerto	Barcos y barcazas	Carga y descarga por los estibadores

El EuroDisney de París, el Disney Japan de Tokio y Disneyland y Disney World de Estados Unidos tienen todos una característica en común: largas colas y esperas aparentemente interminables. Sin embargo, Disney es una de las empresas líderes del mundo en el análisis científico de la teoría de colas. Analiza el comportamiento de las colas y es capaz de predecir la cantidad de gente que atraerá cada atracción. Para mantener a los visitantes contentos, Disney consigue que las colas parezcan estar moviéndose constantemente hacia adelante, entretiene a la gente mientras espera, y pone carteles que indican a los visitantes cuántos minutos les quedan para llegar a cada atracción.

Los modelos de líneas de espera son útiles tanto en servicios como en fabricación. El análisis de las colas en términos de longitud de la cola, tiempo medio de espera y otros factores nos ayuda a comprender los sistemas de servicios (tales como los puestos de cajeros de bancos), las actividades de mantenimiento (que deben reparar la maquinaria averiada) y las actividades de control en los talleres. De hecho, los pacientes que esperan en la consulta de un médico y las taladradoras averiadas esperando a ser reparadas en un taller de reparación tienen mucho en común desde una perspectiva de dirección de operaciones. En ambos casos se utilizan recursos humanos y maquinaria para reponer en buen estado de funcionamiento a valiosos activos productivos (personas y máquinas).

CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE COLAS

En este apartado analizamos brevemente las tres partes de un sistema de cola o línea de espera (como se muestra en la Figura D.1):

1. *Llegadas o entradas al sistema.* Éstas tienen características como el tamaño de la población, su comportamiento y su distribución estadística.
2. *Disciplina de la cola o la línea de espera propiamente dicha*. Las características de la cola incluyen si es limitada o ilimitada en su longitud, y la disciplina de las personas u objetos en ella.
3. *Instalación de servicio*. Sus características incluyen su diseño y la distribución estadística de los tiempos de servicio.

Ahora examinemos cada una de estas tres partes.

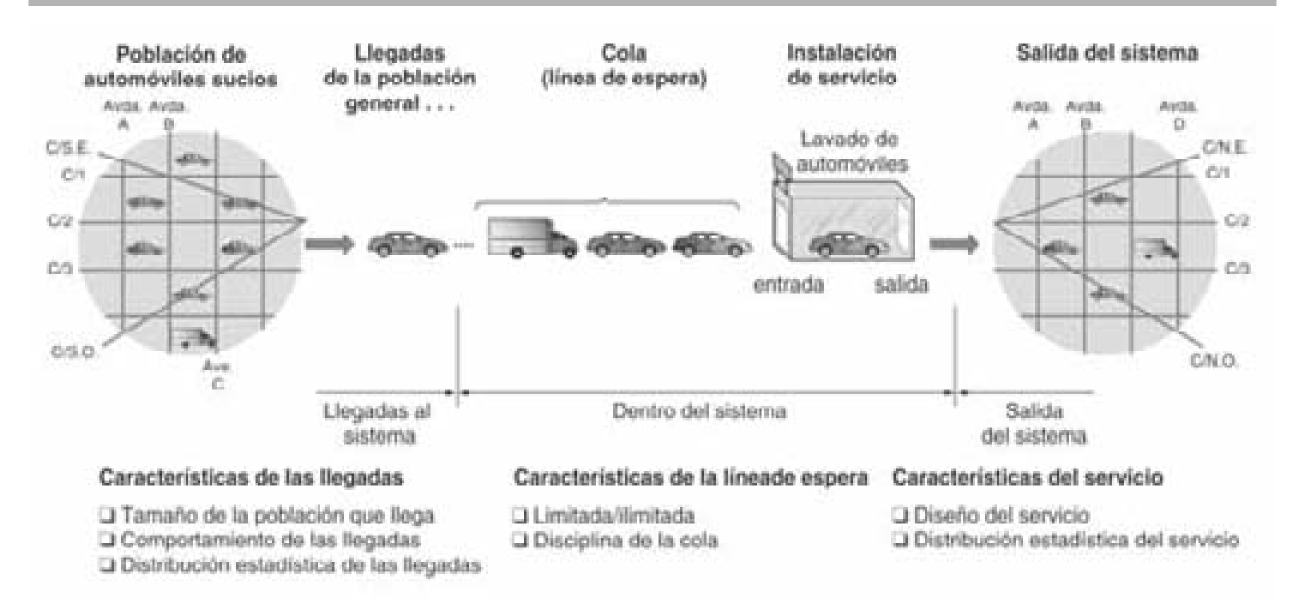


FIGURA D.1 ■ Las tres partes de una línea de espera, o sistema de colas, en Lavado de Automóviles Dave

Características de las llegadas

La fuente de entradas que origina las llegadas o clientes a un sistema de servicios tiene tres características principales:

1. *Tamaño* de la población de llegada.
2. *Comportamiento* de las llegadas.
3. *Patrón* de llegadas (distribución estadística).

Tamaño de la población de llegada (origen) Los tamaños de la población pueden ser, o bien ilimitados (básicamente infinitos), o bien limitados (finitos). Cuando el número de clientes o llegadas en cualquier momento dado es sólo una pequeña parte de todas las llegadas potenciales, la población de llegada se considera **ilimitada** o **infinita**. Ejemplos de poblaciones ilimitadas: automóviles que llegan a un lavado de automóviles en una gran ciudad, los clientes que llegan a un supermercado y los estudiantes que llegan para matricularse en una gran universidad. La mayoría de los modelos de colas asumen una población que llega infinita. Un ejemplo de población **limitada** o **finita** se puede encontrar en una tienda de fotocopias que tiene, pongamos, ocho fotocopiadoras. Cada una de las máquinas es un "cliente" en potencia que podría romperse y necesitar reparación.

Población ilimitada o infinita
Cola en la que un número prácticamente ilimitado de personas o artículos podría solicitar un servicio, o en la que el número de clientes o llegadas presentes en cualquier momento dado es una proporción muy pequeña de las llegadas potenciales.

Población limitada o finita
Cola en la que sólo hay un número limitado de usuarios potenciales del servicio.

Patrón de llegadas al sistema Los clientes llegan a las instalaciones del servicio, bien siguiendo una programación conocida (por ejemplo, 1 paciente cada 15 minutos o 1 estudiante cada media hora), o bien llegan *aleatoriamente*. Las llegadas son aleatorias cuando son independientes unas de otras y no puede precisarse con exactitud su ocurrencia. Frecuentemente, en los problemas de colas, se puede estimar el número de las llegadas por unidad de tiempo mediante una distribución de probabilidad conocida como **distri-**

Distribución de Poisson Distribución de probabilidad discreta que, a menudo, describe la tasa de llegadas en la teoría de colas.

bución de Poisson [1]. Dada una tasa de llegadas (como dos clientes a la hora o cuatro camiones por minuto), se puede establecer una distribución de Poisson discreta mediante la fórmula

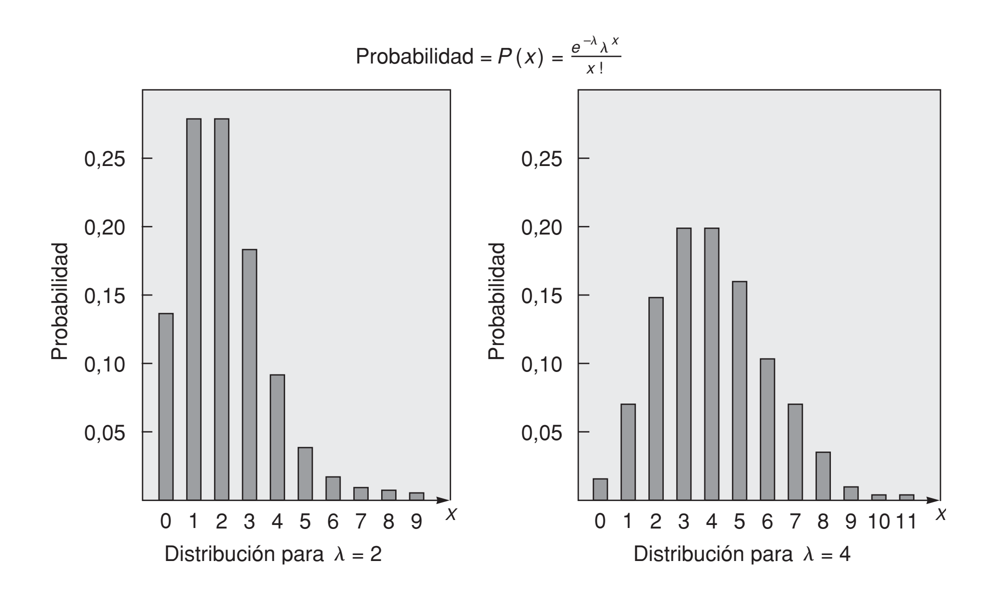
$$P(x) = \frac{e^{-\lambda}\lambda^{x}}{x!} \quad \text{para } x = 0, 1, 2, 3, 4, \ldots \qquad \textbf{(D.1)}$$

donde $P(x)$ = probabilidad de x llegadas
x = número de llegadas por unidad de tiempo
λ = ritmo medio de llegada
e = 2,7183 (que es la base de los logaritmos neperianos)

Con la ayuda de la tabla del Apéndice II, que da el valor de $e^{-\lambda}$ para su uso en la distribución de Poisson, es fácil calcular estos valores. La Figura D.2 muestra la distribución de Poisson para $\lambda = 2$ y $\lambda = 4$. Esto significa que, si el ritmo de llegadas medio es de $\lambda = 2$ clientes por hora, la probabilidad de que lleguen 0 clientes en cualquier hora elegida al azar es de aproximadamente el 13 por ciento, la probabilidad de 1 cliente es de aproximadamente el 27 por ciento, 2 clientes un 27 por ciento, 3 clientes un 18 por ciento, 4 clientes un 9 por ciento, y así sucesivamente. Las posibilidad de que lleguen 9 o más es prácticamente nula. Las llegadas, por supuesto, no se distribuyen siempre según una distribución de Poisson (pueden seguir otra distribución). Por tanto, los patrones de llegada deben ser examinados para asegurarse de que se ajustan bien a una distribución de Poisson antes de aplicar esta distribución.

Comportamiento de las llegadas La mayoría de los modelos de colas dan por sentado que un cliente que llega es un cliente paciente. Los clientes pacientes son personas o

FIGURA D.2 ■ Dos ejemplos de la distribución de Poisson para los tiempos de llegada



[1] Cuando los ritmos de llegadas siguen un proceso de Poisson con una tasa de llegadas media λ, el tiempo entre las llegadas sigue una distribución exponencial negativa con un tiempo medio entre llegadas de $1/\lambda$. Por lo tanto, la distribución exponencial negativa es también representativa de un proceso de Poisson, pero describe el tiempo entre llegadas y especifica que estos intervalos de tiempo son completamente aleatorios.

máquinas que esperan en la cola hasta que las atienden y no pasan de una cola a otra. Desgraciadamente, la vida se complica por el hecho de que la gente tiende a renunciar o a desistir. Los clientes que *renuncian* no se ponen en la línea de espera porque es demasiado larga para ajustarse a sus necesidades o intereses. Los clientes que *desisten* son aquellos que se ponen en la cola pero luego se impacientan y se van sin realizar su transacción. En realidad, ambas situaciones sirven justamente para destacar la necesidad de la teoría de las colas y el análisis de las líneas de espera.

"La otra cola siempre avanza más deprisa".
Observación de Etorre

"Si te cambias de cola, la que acabas de dejar empezará a avanzar más deprisa que la cola en que te acabas de poner".
Variación de O'Brien

Características de las colas

La línea de espera en sí misma es el segundo componente de un sistema de colas. La longitud de una cola puede ser también limitada o ilimitada. Una cola es *limitada* cuando no puede, bien por ley o bien por restricciones físicas, aumentar hasta una longitud infinita. Una barbería pequeña, por ejemplo, sólo tendrá un número limitado de asientos para esperar. Los modelos de colas se tratan en este módulo partiendo del supuesto de longitud *ilimitada* de la cola. Una cola es *ilimitada* cuando su tamaño no tiene restricciones, como en el caso de las cabinas de peaje que atienden a los automóviles que llegan.

Una segunda característica de las líneas de espera hace referencia a la *disciplina de la cola*. Esto se refiere a la regla por la que se va a atender a los clientes en la cola. La mayoría de los sistemas utilizan una disciplina de cola conocida como **regla del primero que entra, primero que sale (*First In, First Out,* FIFO)**. Sin embargo, en la sala de urgencias de un hospital o en la cola de una caja rápida de un supermercado, diferentes asignaciones de prioridad pueden reemplazar a la regla FIFO. Los pacientes con heridas graves tendrán prioridad para el tratamiento frente a los pacientes con dedos o narices rotas. Los clientes con menos de 10 artículos están autorizados a pasar por la cola de la caja rápida (aunque *entonces* se los trata según el primero que entra, primero que sale). La ejecución de programas informáticos también opera según una programación de prioridades. En la mayoría de las grandes empresas, cuando las nóminas informatizadas tienen que salir en una fecha específica, el programa de nóminas recibe la máxima prioridad[2].

Regla del primero que entra, primero que sale (FIFO: *First In, First Out*)
Disciplina de cola en la que los primeros clientes en la cola son atendidos primero.

Características del servicio

La tercera parte de cualquier servicio de colas son las características del servicio. Son importantes dos propiedades básicas: (1) el diseño del sistema de servicio y (2) la distribución de los tiempos de servicio.

Diseños básicos de los sistemas de colas Los sistemas de servicio se clasifican habitualmente según su número de canales (por ejemplo, número de servidores) y el número de fases (por ejemplo, número de paradas de servicio que deben hacerse). Un **sistema de cola de canal único**, con un solo servidor, está representado por el autobanco con un solo cajero abierto. Si, por otro lado, el banco tiene varios cajeros en servicio, con cada cliente que espera en una cola común a que quede libre el primer cajero, entonces tendríamos un **sistema de cola de múltiples canales**. La mayoría de los bancos actuales son sistemas de servicio multicanal, al igual que la mayoría de las grandes barberías, mostradores de expedición de billetes aéreos y oficinas de correos.

Sistema de cola de canal único
Sistema de servicio con una cola y un servidor.

Sistema de cola de múltiples canales (multicanal)
Sistema de servicio con una sola línea de espera pero con varios servidores.

---

[2] El término FIFS (primero que entra, primero servido, *First In, First Served*) se utiliza a menudo en lugar del FIFO. Otra disciplina, la LIFS (último que entra, primero servido, *Last In, First Served*), también llamada último que entra, primero que sale (LIFO, *Last In, First Out*), suele aplicarse cuando los materiales se almacenan o apilan de forma que los artículos que están arriba se utilizan los primeros.

Sistema de fase única
Sistema en el que el cliente recibe el servicio de un solo puesto o estación y a continuación sale del sistema.

Sistema multifase
Sistema en el que el cliente recibe el servicio en varios puestos o estaciones antes de salir del sistema.

En un **sistema de fase única** el cliente recibe servicio sólo en un puesto o estación y a continuación abandona el sistema. Un restaurante de comida rápida en el que la persona que toma el pedido también le trae la comida y cobra es un sistema de fase única. También lo es una agencia de permisos de conducir en la que la persona que toma su solicitud también puntúa su test y le cobra el pago por el permiso. Sin embargo, pongamos que el restaurante le pide que haga su pedido en un puesto, pague en otro y recoja su comida en un tercero. En este caso, es un **sistema multifase**. Análogamente, si la agencia de permisos de conducir es grande o muy concurrida, probablemente tenga que esperar en una cola para rellenar su solicitud (la primera parada para el servicio), hacer otra cola para que le puntúen el examen, y finalmente pasar a otro mostrador para pagar su permiso. Para ayudarle a relacionar los conceptos de canales y fases, la Figura D.3 presenta cuatro posibles configuraciones de canales.

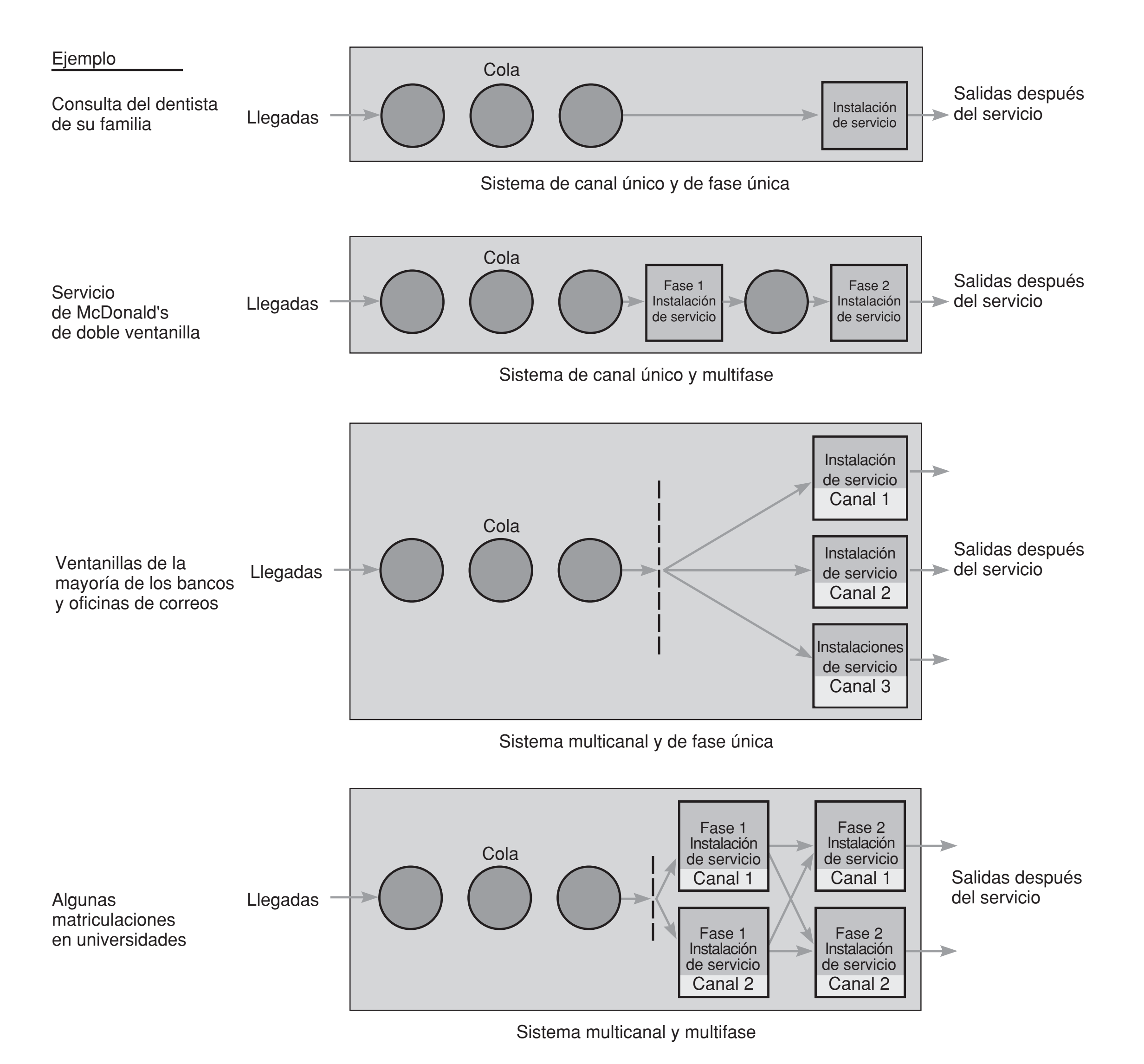


FIGURA D.3 ■ Diseños básicos de los sistemas de colas

Distribución del tiempo de servicio Los patrones de servicio son como los patrones de llegadas en que pueden ser constantes o aleatorios. Si el tiempo de servicio es constante, lleva el mismo tiempo atender a cada cliente. Es el caso de un servicio operado por máquinas, como un lavado de automóviles automático. Más frecuentemente, los tiempos de servicio se distribuyen aleatoriamente. En muchos casos, podemos asumir que los tiempos de servicio aleatorios se describen mediante la **distribución de probabilidad exponencial negativa**.

Distribución de probabilidad exponencial negativa Distribución de probabilidad continua, utilizada a menudo para describir el tiempo de servicio en un sistema de colas.

La Figura D.4 muestra que, si los *tiempos de servicio* siguen una distribución exponencial negativa, la probabilidad de un tiempo de servicio muy largo es baja. Por ejemplo, cuando el tiempo medio de servicio es de 20 minutos (o 3 clientes por hora), rara vez un cliente necesitará estar más de 1,5 horas (90 minutos) en la instalación de servicio. Si el tiempo medio de servicio es de 1 hora, la probabilidad de emplear más de 3 horas en el servicio es bastante baja.

Medidas de rendimiento de las colas

Los modelos de colas ayudan a los directivos a tomar decisiones que equilibren los costes del servicio con los costes de las líneas de espera. El análisis de las colas puede proporcionar muchas medidas del rendimiento de un sistema de línea de espera, entre las que se incluyen las siguientes:

1. Tiempo medio que cada cliente u objeto pasa en la cola.
2. Longitud media de la cola.
3. Tiempo medio que cada cliente pasa en el sistema (tiempo de espera más tiempo de servicio).
4. Número medio de clientes en el sistema.
5. Probabilidad de que la instalación de servicio esté inactiva.
6. Factor de utilización del sistema.
7. Probabilidad de que haya un número específico de clientes en el sistema.

Aunque las distribuciones de Poisson y exponenciales se usan de forma habitual para describir tasas de llegada y tiempos de servicio, las distribuciones normal y Erlang, u otras distribuciones, pueden ser más válidas en ciertos casos.

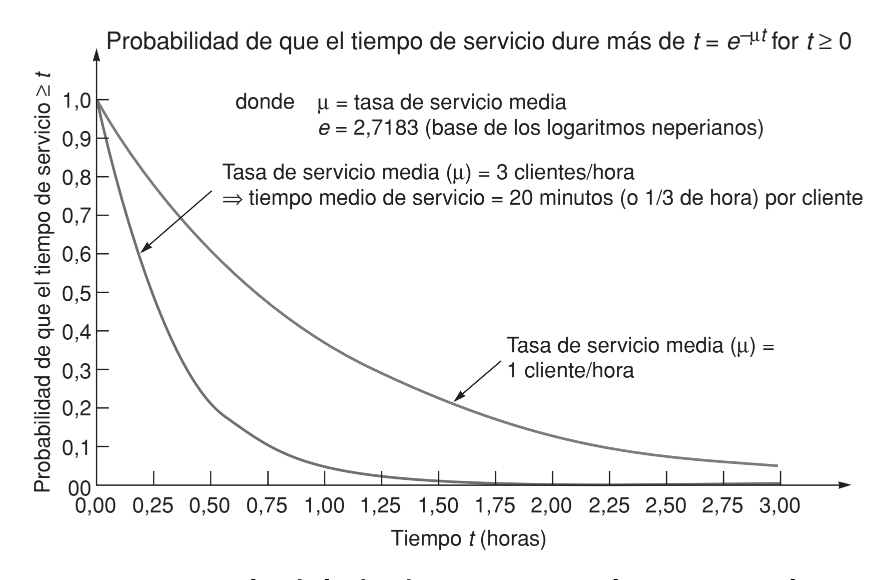


FIGURA D.4 ■ Dos ejemplos de la distribución exponencial negativa para los tiempos de servicio

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

L.L. BEAN RECURRE A LA TEORÍA DE COLAS

L.L. Bean se enfrentaba a serios problemas. Era la temporada de máximas ventas, y el nivel de servicio a las llamadas que llegaban de los clientes era sencillamente inaceptable. Generalmente conocida como empresa detallista de artículos de abrigo de alta calidad, alrededor del 65 por ciento del volumen de ventas de L.L. Bean se generaba mediante pedidos telefónicos a través de sus centros de servicio de llamadas gratuitas situados en Maine.

Así de crítica era la situación: Durante algunos periodos, el 80 por ciento de las llamadas recibían la señal de ocupado, y las que no, tenían que esperar a menudo hasta 10 minutos antes de poder hablar con un agente de ventas. L.L. Bean estimaba una pérdida de 10 millones de dólares en beneficios por la forma en que asignaba los recursos de venta por teléfono. Mantener a los clientes "en la cola" (al teléfono) le estaba costando 25.000 dólares al día. En días excepcionalmente ocupados, el total de pedidos perdidos por problemas de cola se acercaba a 500.000 dólares de ingresos brutos.

Gracias al desarrollo de modelos de colas similares a los que se presentan aquí, L.L. Bean pudo determinar el número de líneas telefónicas y el número de agentes en servicio para atender las llamadas, durante cada media hora todos los días de la temporada. Al cabo de un año, la utilización del modelo consiguió que se contestara un 24 por ciento más de llamadas, recibir un 17 por ciento más de pedidos, y 16 por ciento más de ingresos. El nuevo sistema también supuso una reducción del 81 por ciento de llamadas abandonadas y un tiempo de respuesta más rápido del 84 por ciento. El porcentaje de llamadas con menos de 20 segundos de espera aumentó del 25 por ciento al 75 por ciento. Huelga decir que la teoría de colas cambió la forma de pensar que tenía L.L. Bean sobre las telecomunicaciones.

Fuentes: Modern Material Handling (diciembre de 1997): S12-S14; e *Interfaces* (enero-febrero de 1991): 75-91 y (marzo-abril de 1993): 14-20.

COSTES DE LAS COLAS

Como se describe en el recuadro sobre *Dirección de producción en acción*, "L.L. Bean recurre a la teoría de colas", los directores de operaciones deben admitir el equilibrio que tiene lugar entre dos costes: el coste de proporcionar un buen servicio y el coste del tiempo de espera del cliente o de las máquinas. Los directivos quieren colas que sean lo suficientemente cortas para que los clientes no se sientan descontentos y, o bien se vayan sin comprar, o bien compren pero no vuelvan más. Sin embargo, los directivos podrían estar dispuestos a admitir cierta espera si ésta se equilibra con un ahorro significativo de los costes de servicio.

Un medio para evaluar una instalación de servicio es determinar su coste estimado total. El coste total es la suma de los costes de servicio esperados más los costes estimados de la espera.

¿Qué le revela la larga espera en la típica consulta de médico acerca de la percepción que tiene éste sobre su coste de espera?

Como se puede ver en la Figura D.5, los costes de servicio aumentan a medida que la empresa intenta aumentar su nivel de servicio. Los directivos de *algunos* centros de servicio pueden variar la capacidad manteniendo un retén de personal y maquinaria que pueden asignar a puestos de servicio específicos para evitar o acortar unas colas excesivamente largas. En las tiendas de alimentación, por ejemplo, los directivos y los encargados de ventas pueden abrir cajas adicionales. En los bancos y en los puestos de facturación de los aeropuertos, puede llamarse a trabajadores a tiempo parcial para ayudar. Sin embargo, a medida que mejora el nivel de servicio (es decir, se acelera), el coste del tiempo empleado esperando en las colas disminuye (*véase* de nuevo la Figura D.5). El coste de la espera puede reflejar la pérdida de productividad de los trabajadores mientras las herramientas o máquinas esperan a ser reparadas, o bien puede ser simplemente una estimación del coste de clientes perdidos a causa de un mal servicio y largas colas. En algunos sistemas de servi-

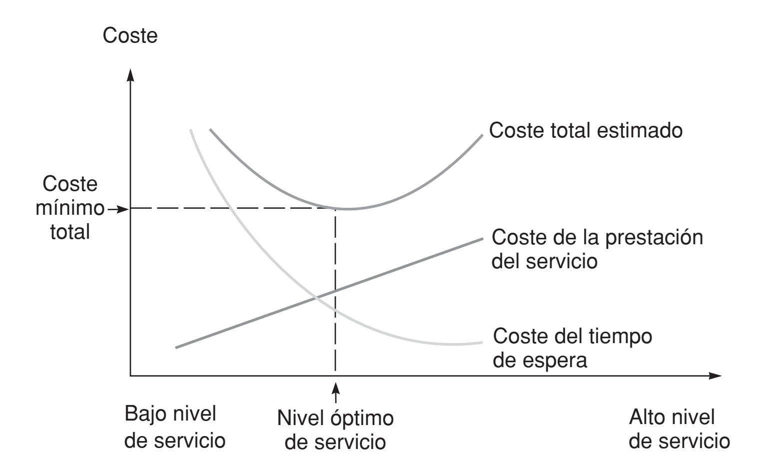


FIGURA D.5 ■ El equilibrio entre costes de espera y costes de servicio

Distintas organizaciones otorgan distintos valores al tiempo de sus clientes, ¿verdad?

cio (por ejemplo, un servicio de ambulancias de urgencia), el coste de largas colas de espera podría ser intolerablemente alto.

LA VARIEDAD DE LOS MODELOS DE COLAS

Se puede aplicar una amplia variedad de modelos de colas en la dirección de operaciones. Vamos a presentar cuatro de los modelos más ampliamente utilizados. Están explicados resumidamente en la Tabla D.2 y se pueden ver ejemplos de cada uno de ellos en los apartados que siguen a continuación. En libros de texto sobre teoría de colas se describen modelos más complejos[3], o se pueden desarrollar mediante la utilización de la simulación (que es el tema del Módulo F). Observe que los cuatro modelos de colas presentados en la Tabla D.2 tienen tres características comunes. Todos parten de los supuestos de:

Visite un banco o un restaurante con servicio desde el automóvil y anote los instantes de las llegadas para ver qué clase de distribución pueden reflejar (de Poisson u otra).

TABLA D.2 ■ Modelos de colas descritos en este capítulo

Modelo	Nombre (técnico entre paréntesis)	Ejemplo	Número de canales	Número de fases	Patrón del ritmo de llegada	Patrón del tiempo de servicio	Tamaño de la población	Disciplina de la cola
A	Sistema de canal único (M/M/1)	Mostrador de información en unos grandes almacenes	Uno	Una	Poisson	Exponencial	Ilimitada	FIFO
B	Multicanal (M/M/S)	Mostrador de compañía aérea	Multi-canal	Una	Poisson	Exponencial	Ilimitada	FIFO
C	Servicio constante (M/D/1)	Túnel de lavado de automóviles automático	Uno	Una	Poisson	Constante	Ilimitada	FIFO
D	Población limitada (población finita)	Tienda con sólo una docena de máquinas que pueden estropearse	Uno	Una	Poisson	Exponencial	Limitada	FIFO

[3] *Véase*, por ejemplo, N. U. Prabhu, *Foundations of Queuing Theory,* Kluwer Academic Publishers (1997).

1. Llegadas que siguen una distribución de Poisson.
2. Disciplina FIFO.
3. Un servicio de una fase.

Además, todos ellos describen sistemas de servicios que operan en condiciones permanentemente estables. Esto significa que los ritmos de llegada y servicio permanecen estables durante el análisis.

Modelo A (M/M/1): Modelo de cola de canal único con llegadas de Poisson y tiempos de servicio exponenciales

El caso más habitual de problemas de colas es el de línea de espera de *canal único*, o de servidor único. En esta situación, las unidades que llegan forman una cola única que será atendida por un puesto o estación única (*véase* la Figura D.3). Partimos del supuesto de que se dan las siguientes condiciones en este tipo de sistema:

1. Las llegadas son atendidas sobre la base del "primero que entra, primero que sale" (FIFO), y cada llegada espera a ser atendida, independientemente de la longitud de la cola.
2. Las llegadas son independientes de las llegadas anteriores, pero el número medio de llegadas (*ritmo de llegadas*) no cambia en el tiempo.
3. Las llegadas siguen una distribución de probabilidades de Poisson y proceden de una población infinita (o muy, muy grande).
4. Los tiempos de servicio varían de un cliente a otro y son independientes uno de otro, pero se conoce su ritmo medio.
5. Los tiempos de servicio siguen una distribución de probabilidades exponencial negativa.
6. El ritmo de servicio es más rápido que el ritmo de llegada.

¿Cuáles son las consecuencias de tener la misma tasa de servicio y de llegadas?

Cuando se cumplen estas condiciones, se puede utilizar la serie de ecuaciones mostradas en la Tabla D.3. Los Ejemplos D1 y D2 ilustran cómo puede utilizarse el modelo A (que en revistas técnicas se conoce como el modelo M/M/1)[4].

TABLA D.3 ■ Fórmulas de colas para el modelo A: sistema de un único canal, también llamado M/M/1

λ = Número medio de llegadas por periodo de tiempo

μ = Número medio de personas o artículos atendidas por período de tiempo

L_s = Número medio de unidades (clientes) en el sistema (esperando a ser atendidas)

$$= \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

[4] En la notación de la teoría de colas la primera letra hace referencia a las llegadas (donde M representa la distribución de Poisson); la segunda letra hace referencia al servicio (donde M es, de nuevo, la distribución de Poisson, que es lo mismo que una tasa exponencial del servicio, y una D es una tasa de servicio constante); el tercer símbolo hace referencia al número de servidores. Así pues, un sistema M/D/1 (nuestro modelo C) tiene unas llegadas que siguen la distribución de Poisson, un servicio constante y un servidor.

W_s = tiempo medio que una unidad pasa en el sistema (tiempo de espera más tiempo de servicio)

$= \dfrac{1}{\mu - \lambda}$

L_q = número medio de unidades esperando en la cola

$= \dfrac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$

W_q = tiempo medio que una unidad pasa esperando en la cola

$= \dfrac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$

ρ = factor de utilización del sistema

$= \dfrac{\lambda}{\mu}$

P_0 = probabilidad de que haya 0 unidades en el sistema (es decir, la unidad de servicio está parada)

$= 1 - \dfrac{\lambda}{\mu}$

$P_{n>k}$ = probabilidad de más de k unidades en el sistema, donde n es el número de unidades en el sistema

$= \left(\dfrac{\lambda}{\mu}\right)^{k+1}$

EJEMPLO D1

Una cola con un único canal

Tom Jones, el mecánico de Golden Muffler Shop, está preparado para instalar nuevos tubos de escape a un ritmo medio de 3 por hora (o aproximadamente 1 cada 20 minutos), según una distribución exponencial negativa. Los clientes que buscan este servicio llegan al taller a un promedio de 2 por hora, siguiendo una distribución de Poisson. Se los atiende sobre la base del primero que entra, primero que sale, y proceden de una población de posibles clientes muy grande, casi infinita.

A partir de esta descripción, podemos obtener las características de funcionamiento del sistema de colas de Golden Muffler.



λ = 2 automóviles que llegan por hora

μ = 3 automóviles atendidos por hora

$L_s = \dfrac{\lambda}{\mu - \lambda} = \dfrac{2}{3-2} = \dfrac{2}{1}$

= 2 automóviles en el sistema, como promedio

$W_s = \dfrac{1}{\mu - \lambda} = \dfrac{1}{3-2} = 1$

= tiempo medio de espera en el sistema de una hora



El Ejemplo D1 se ilustra con más detalle en el ejercicio Active Model D1 del CD-ROM.

$L_q = \dfrac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = \dfrac{2^2}{3(3-2)} = \dfrac{4}{3(1)} = \dfrac{4}{3}$

= 1,33 automóviles esperando en la cola, como promedio

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{2}{3(3-2)} = \frac{2}{3} \text{ hora}$$

= 40 minutos de tiempo medio de espera por automóvil

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{2}{3}$$

= el mecánico está ocupado el 66,6% del tiempo

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu} = 1 - \frac{2}{3}$$

= probabilidad de 0,33 de que haya 0 automóviles en el sistema

Probabilidad de más de *k* automóviles en el sistema

k	$P_{n>k} = (2/3)^{k+1}$
0	**0,667** ← Observe que esto es igual a $1 - P_0 = 1 - 0{,}33 = 0{,}667$.
1	0,444
2	0,296
3	**0,198** ← Implica que hay una posibilidad del 19,8% de que haya más de 3 automóviles en el sistema.
4	0,132
5	0,088
6	0,058
7	0,039

Una vez calculadas las características operativas de un sistema de colas, suele ser importante hacer un análisis económico de su impacto. Aunque el modelo de colas descrito arriba es valioso para predecir los posibles tiempos de espera, la longitud de las colas, los tiempos de inactividad, etcétera, no identifica las decisiones óptimas ni tiene en cuenta factores de costes. Como vimos anteriormente, la solución a un problema de colas puede exigir que la dirección tenga que efectuar un equilibrio entre el aumento de costes por suministrar un mejor servicio y la reducción de costes de espera derivados de proporcionar ese servicio.

El Ejemplo D2 analiza los costes del Ejemplo D1.

EJEMPLO D2

Análisis económico del Ejemplo D1

El propietario de Golden Muffler Shop estima que el coste del tiempo de espera del cliente, en cuanto insatisfacción del cliente y pérdida de reputación, es de 10 dólares por hora de tiempo consumido *esperando* en la cola. Dado que el automóvil medio tiene una espera de 2/3 de hora (W_q), y dado que hay aproximadamente 16 automóviles atendidos al día (2 llegadas por hora por 8 horas de trabajo al día), el número total de horas que los clientes consumen esperando cada día para que les instalen un tubo de escape es

$$\frac{2}{3}(16) = \frac{32}{3} = 10\,\frac{2}{3} \text{ hora}$$

L_q y W_q son los dos parámetros más importantes de las colas cuando se realiza el análisis de costes.

Por tanto, en este caso,

$$\text{Coste del tiempo de espera de los clientes} = 10\$ \left(10\,\frac{2}{3}\right) = 106{,}67 \text{ dólares al día}$$

El único otro coste importante que el propietario de Golden puede identificar en la situación de cola es el salario de Jones, el mecánico, que gana 7 dólares por hora, o 56 dólares al día. Así pues:

Costes estimados totales = 106,67$ + 56$
= 162,67 dólares al día

Este enfoque será de utilidad en el Problema Resuelto D.2 que veremos más adelante.

Un $P_{n>3}$ de 0,0625 significa que la posibilidad de tener más de 3 clientes en la cola de facturación de un aeropuerto en algún momento del día es de 1 entre 16. Si esta agencia de British Airways puede tolerar tener a 4 o más pasajeros en cola alrededor del 6 por ciento del tiempo, un empleado de servicio será suficiente. De lo contrario, habrá que añadir más puestos de facturación y personal.

Modelo B (M/M/S): Modelo de cola con múltiples canales

Ahora vamos a analizar un sistema de cola con múltiples canales en el que dos o más servidores o canales están disponibles para atender a los clientes que llegan. Seguiremos dando por sentado que los clientes a la espera de ser atendidos forman una cola única y a continuación pasan al primer servidor disponible. Las líneas de espera multicanal y de una sola fase se encuentran actualmente en muchos bancos: se forma una cola común y el cliente en cabeza de la cola pasa a la primera ventanilla libre (*véase* la Figura D.3 para una configuración multicanal típica).

El sistema multicanal presentado en el Ejemplo D3, de nuevo da por sentado que las llegadas siguen una distribución de probabilidad de Poisson y que los tiempos de servicio se distribuyen exponencialmente. El servicio es primero que llega, primero en ser atendido, y se supone que todos los servidores funcionan al mismo ritmo. También son de aplicación los demás supuestos que se expusieron anteriormente.

Las ecuaciones del sistema de colas de este modelo B (que también lleva el nombre técnico de M/M/S) se muestran en la Tabla D.4. Estas ecuaciones son obviamente más

TABLA D.4 ■ Fórmulas de colas para el modelo B: Sistema multicanal, también llamado M/M/S

M = número medio de canales abiertos
λ = ritmo medio de las llegadas
μ = ritmo medio de servicios en cada canal

La probabilidad de que haya cero personas o unidades en el sistema es

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{M-1} \frac{1}{n!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n\right] + \frac{1}{M!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^M \frac{M\mu}{M\mu - \lambda}} \qquad \text{para } M\mu > \lambda$$

El número medio de personas o unidades en el sistema es

$$L_s = \frac{\lambda\mu(\lambda/\mu)^M}{(M-1)!(M\mu-\lambda)^2}P_0 + \frac{\lambda}{\mu}$$

El tiempo medio que una unidad pasa en las colas de espera o siendo atendida (o sea, en el sistema) es

$$W_s = \frac{\mu(\lambda/\mu)^M}{(M-1)!(M\mu-\lambda)^2}P_0 + \frac{1}{\mu} = \frac{L_s}{\lambda}$$

El número medio de personas o unidades en la cola esperando ser atendidas es

$$L_q = L_s - \frac{\lambda}{\mu}$$

El tiempo medio que una persona o unidad pasa en la cola esperando a ser atendida es

$$W_q = W_s - \frac{1}{\mu} = \frac{L_q}{\lambda}$$

complejas que las que se utilizan en el modelo de canal único y, sin embargo, se utilizan exactamente de la misma forma y proporcionan el mismo tipo de información que el modelo más sencillo. (*Nota*: El software de POM para Windows y Excel OM descritos más adelante en este capítulo pueden resultar muy útiles en la resolución de problemas de colas de múltiples canales, así como de otros problemas de colas).

EJEMPLO D3





El Golden Muffler Shop ha decidido abrir una segunda plataforma para cambio de tubos de escape y contratar a un segundo mecánico para atender las instalaciones. Los clientes, que llegan a un ritmo de aproximadamente $\lambda = 2$ por hora, esperarán en una cola única hasta que uno de los dos mecánicos quede libre. Cada mecánico instala los tubos de escape a un ritmo de aproximadamente $\mu = 3$ por hora.

Para averiguar en qué se asemeja o diferencia este sistema del antiguo sistema de espera de canal único, calcularemos diferentes características operativas para el sistema de dos canales, M = 2, y compararemos los resultados con los del Ejemplo D1:

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{1} \frac{1}{n!}\left(\frac{2}{3}\right)^n\right] + \frac{1}{2!}\left(\frac{2}{3}\right)^2 \frac{2(3)}{2(3) - 2}}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{2}{3} + \frac{1}{2}\left(\frac{4}{9}\right)\left(\frac{6}{6 - 2}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} + \frac{1}{3}} = \frac{1}{2}$$

= probabilidad de 0,5 de que haya cero automóviles en el sistema

Entonces,

$$L_s = \frac{(2)(3)(2/3)^2}{1![2(3) - 2]^2}\left(\frac{1}{2}\right) + \frac{2}{3} = \frac{8/3}{16}\left(\frac{1}{2}\right) + \frac{2}{3} = \frac{3}{4}$$

= 0,75 número medio de automóviles en el sistema

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} = \frac{3/4}{2} = \frac{3}{8} \text{ hora}$$

= 22,5 minutos de tiempo medio que un automóvil pasa en el sistema

$$L_q = L_s \frac{\lambda}{\mu} = \frac{3}{4} - \frac{2}{3} = \frac{9}{12} - \frac{8}{12} = \frac{1}{12} =$$

= 0,083 número medio de automóviles en la cola (esperando)

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{0{,}083}{2} = 0{,}0415 \text{ hora}$$

= 2,5 minutos de tiempo medio que un automóvil pasa en la cola (esperando)



Los Ejemplos D2 y D3 se ilustran con más detalle en el ejercicio Active Model D.2 del CD-ROM y en un ejercicio al final del capítulo.

Podemos resumir estas características del modelo de dos canales del Ejemplo D3 y compararlas con las del modelo de canal único del Ejemplo D1 como sigue:

	Canal único	Dos canales
P_0	0,33	0,5
L_s	2 automóviles	0,75 automóviles
W_s	60 minutos	22,5 minutos
L_q	1,33 automóviles	0,083 automóviles
W_q	40 minutos	2,5 minutos

El incremento del servicio tiene un efecto espectacular en casi todas las características. Por ejemplo, observemos que el tiempo de espera en la cola se reduce de 40 minutos a sólo 2,5 minutos.

Utilización de las tablas de colas Imagine el trabajo que tendría que hacer un directivo que tuviera que resolver modelos de colas con $M = 3$, 4 o 5 canales si no se dispusiera de computadoras. Las operaciones aritméticas se van haciendo cada vez más pesadas. Afortunadamente, se puede evitar gran parte de la carga de analizar manualmente las colas con múltiples canales utilizando la Tabla D.5. Esta tabla, resultado de cientos de cálculos, presenta la relación entre tres factores: (1) factor de utilización de la instalación de servicio, ρ (que es fácil de calcular: sencillamente λ/μ) (2) número de canales de servicio abiertos, y (3) el número medio de clientes en la cola L_q (que es lo que quisiéramos averiguar). Dada cualquier combinación de tasa de utilización (ρ) y $M = 1, 2, 3, 4$ o 5 canales de servicio abiertos, usted puede encontrar rápidamente en la tabla el valor apropiado de Lq.

El Ejemplo D4 muestra cómo se utiliza la Tabla D.5.

EJEMPLO D4

Utilización de las tablas de colas

El Banco Nacional de Alaska quiere averiguar cuántas ventanillas de autobanco debe abrir un sábado de mucha demanda. El consejero delegado Ted Eschenbach estima que los clientes llegan a un ritmo de alrededor de $\lambda = 18$ por hora, y que cada cajero puede atender a unos $\mu = 20$ clientes por hora. Entonces la tasa de utilización es $\rho = \lambda/\mu = 18/20 = 0{,}90$. Si mira en la Tabla D.5 donde pone $\rho = 0{,}90$, Ted ve que si sólo abre una ventanilla de servicio, $M = 1$, el número medio de clientes en la cola será de 8,1. Si abre dos ventanillas, Lq disminuye a 0,2285 clientes, a 0,03 para $M = 3$ cajeros, y a 0,0041 para $M = 4$ cajeros. A partir de este punto, añadir más ventanillas da una longitud media de cola de 0.

También resulta sencillo calcular el tiempo de espera medio en la cola, W_q, puesto que $W_q = L_q/\lambda$. Cuando está abierto un canal, $W_q = 8{,}1$ clientes/(18 clientes por hora) = 0,45 horas = 27 minutos de tiempo de espera; cuando hay abiertos dos cajeros, $W_q = 0{,}2285$ clientes /(18 clientes por hora = 0,0127 horas $\cong 3/4$ de minuto; etcétera.

Puede que también quiera comprobar los cálculos del Ejemplo D3 con los valores de la tabla, aunque sólo sea para practicar el uso de la Tabla D.5. Puede que tenga que interpolar si el valor exacto de ρ no está en la primera columna. Además de la L_q, en los manuales sobre teorías de colas se publican otras características operativas comunes.

TABLA D.5 ■ Valores de L_q para M = 1-5 canales y algunos valores de $\rho = \lambda/\mu$

Llegadas de Poisson, tiempos de servicio exponenciales

	Número de canales de servicio, *M*				
ρ	1	2	3	4	5
0,10	0,0111				
0,15	0,0264	0,0008			
0,20	0,0500	0,0020			
0,25	0,0833	0,0039			
0,30	0,1285	0,0069			
0,35	0,1884	0,0110			
0,40	0,2666	0,0166			
0,45	0,3681	0,0239	0,0019		
0,50	0,5000	0,0333	0,0030		
0,55	0,6722	0,0449	0,0043		
0,60	0,9000	0,0593	0,0061		
0,65	1,2071	0,0767	0,0084		
0,70	1,6333	0,0976	0,0112		
0,75	2,2500	0,1227	0,0147		
0,80	3,2000	0,1523	0,0189		
0,85	4,8166	0,1873	0,0239	0,0031	
0,90	8,1000	0,2285	0,0300	0,0041	
0,95	18,0500	0,2767	0,0371	0,0053	
1,0		0,3333	0,0454	0,0067	
1,2		0,6748	0,0904	0,0158	
1,4		1,3449	0,1778	0,0324	0,0059
1,6		2,8444	0,3128	0,0604	0,0121
1,8		7,6734	0,5320	0,1051	0,0227
2,0			0,8888	0,1739	0,0398
2,2			1,4907	0,2770	0,0659
2,4			2,1261	0,4305	0,1047
2,6			4,9322	0,6581	0,1609
2,8			12,2724	1,0000	0,2411
3,0				1,5282	0,3541
3,2				2,3856	0,5128
3,4				3,9060	0,7365
3,6				7,0893	1,0550
3,8				16,9366	1,5184
4,0					2,2164
4,2					3,3269
4,4					5,2675
4,6					9,2885
4,8					21,6384

Las colas existen no sólo en todas las industrias, sino también en todo el mundo. En el McDonald's de Moscú en la Plaza Pushkin, a cuatro manzanas del Kremlin, se jacta de tener 700 asientos en el interior y 200 en el exterior, da empleo a 800 ciudadanos rusos y genera unos ingresos anuales de 80 millones de dólares. A pesar de su tamaño y volumen, sigue teniendo colas y ha tenido que desarrollar una estrategia para manejarlas.

Modelo C (M/D/1): Modelo de tiempo de servicio constante

Algunos sistemas de servicio tienen tiempos de servicio constantes en lugar estar exponencialmente distribuidos. Cuando se procesan clientes o equipos según un ciclo fijo, como en el caso de un túnel de lavado automático de automóviles o un viaje en una atrac-

TABLA D6 ■
Fórmulas de colas para el modelo C: servicio constante, también llamado M/D/1

Longitud media de la cola: $L_q = \dfrac{\lambda^2}{2\mu(\mu - \lambda)}$

Tiempo medio de espera en la cola: $W_q = \dfrac{\lambda}{2\mu(\mu - \lambda)}$

Número medio de clientes en el sistema: $L_s = L_q + \dfrac{\lambda}{\mu}$

Tiempo medio de espera en el sistema: $W_s = W_q + \dfrac{1}{\mu}$

ción de un parque de atracciones, es adecuado considerar que los tiempos del servicio son constantes. Dado que los ritmos constantes son fijos, los valores para L_q, W_q, L_s y W_s son siempre menores de lo que serían en el modelo A, que tiene las tasas de servicio variables. En realidad, tanto la longitud media de la cola como el tiempo medio de espera en la cola se reducen a la mitad con el modelo C. Las fórmulas del modelo de servicio constante vienen dadas en la Tabla D.6. El modelo C también tiene el nombre técnico de M/D/1 en la literatura sobre teoría de colas.

El Ejemplo D5 analiza el modelo de tiempo de servicio constante.

EJEMPLO D5

Modelo se servicio constante

Garcia-Golding Recycling, Inc., recoge y compacta latas de aluminio y botellas de vidrio en Nueva York. Sus conductores de camiones esperan actualmente una media de 15 minutos antes de vaciar sus cargas para reciclar. El coste del tiempo del conductor y del camión mientras están en la cola es valorado en 60 dólares por hora. Se puede comprar un nuevo compactador automático para procesar las cargas de los camiones a un ritmo constante de 12 camiones por hora (esto es, 5 minutos por camión). Los camiones llegan siguiendo una distribución de Poisson a un ritmo medio de 8 por hora. Si el nuevo compactador se pone en funcionamiento, el coste se amortizará a un ritmo de 3 dólares por camión descargado. La empresa contrata en prácticas a un estudiante de la universidad, que hace el siguiente análisis para evaluar los costes de la adquisición comparados con los beneficios:

Coste actual de la espera/viaje = (1/4 hora de espera actualmente) (coste de 60$/hora)
= 15$/viaje

Nuevo sistema: $\lambda = 8$ llegadas de l = 8 camiones/hora $\mu = 12$ camiones atendidos/hora

Tiempo medio de espera en la cola $= W_q = \dfrac{1}{2\mu(\mu - \lambda)} = \dfrac{8}{2(12)(12 - 8)} = \dfrac{1}{12}$ hora

Coste de espera/viaje con el nuevo compactador = (1/12 hora de espera) (coste de 60$/hora) = 5$/viaje

Ahorro con el nuevo equipo = 15$(sistema actual) − 5$(nuevo sistema) = 10$/viaje

Coste de amortización del nuevo equipo: = 3$/viaje

Ahorro neto: = 7$/viaje





El Ejemplo D5 se ilustra con más detalle en el ejercicio Active Model D.3 del CD-ROM.

Modelo D: Modelo de población limitada

Cuando hay una población limitada de clientes potenciales para una instalación de servicio, debemos considerar un modelo diferente de colas. Este modelo se utilizaría, por ejemplo, si considerásemos las reparaciones de los equipos de una fábrica que tiene cinco máquinas, si estuviéramos a cargo del mantenimiento de una flota de 10 aviones de un puente aéreo entre dos ciudades, o si dirigiéramos un pabellón de hospital que tuviera 20 camas. El modelo de población limitada permite considerar cualquier número de personas para hacer las reparaciones (servidores).

Este modelo difiere de los tres anteriores porque ahora hay una relación *dependiente* entre la longitud de la cola y el ritmo de llegada. Ilustremos la situación extrema: Si su fábrica tuviera cinco máquinas y todas estuviesen rotas y esperando a ser reparadas, el ritmo de llegadas caería a cero. En general, entonces, conforme la *cola* se hace más larga en el modelo de población limitada, el *ritmo de llegadas* de clientes o máquinas disminuye.

La Tabla D.7 muestra las fórmulas de colas para el modelo de población limitada. Observe que se emplea una notación diferente de la de los modelos A, B y C. Para simplificar lo que podría convertirse en unos cálculos que necesitarían mucho tiempo, se han desarrollado tablas de colas finitas que determinan D y F. D representa la probabilidad de que una máquina que tiene que ser reparada deba esperar en la cola. F es un factor de eficiencia del tiempo de espera. D y F son necesarias para calcular la mayoría de las demás fórmulas del modelo finito.

TABLA D.7 ■ Fórmulas de colas y notaciones para el modelo D: fórmulas de población limitada

Factor de servicio: $X = \dfrac{T}{T + U}$	Número medio en funcionamiento: $J = NF(1 - X)$
Número medio en espera: $L = N(1 - F)$	Número medio de personas que se está atendiendo: $H = FNX$
Tiempo medio de espera: $X = \dfrac{L(T + U)}{N - L} = \dfrac{T(1 - F)}{XF}$	Número de población: $N = J + L + H$

Notación

D = probabilidad de que una unidad tenga que esperar en la cola
N = número de clientes potenciales
F = factor de eficiencia
T = tiempo medio de servicio
H = número medio de unidades que se están atendiendo
U = tiempo medio entre requerimientos de servicio para una unidad
J = número medio de unidades que no están en la cola o en la estación de servicio
W = tiempo medio que una unidad de servicio espera en la cola
L = número medio de unidades que están esperando para recibir el servicio
X = factor de servicio
M = número de canales de servicio

Fuente: L. G. Peck y R. N. Hazelwood, *Finite Queuing Tables* (Nueva York: John Wiley, 1958)

Una pequeña parte de las tablas publicadas sobre colas finitas se ilustra en este apartado. La Tabla D.8 proporciona los datos para una población de $N = 5$[5].

Para utilizar la Tabla D.8 seguiremos cuatro pasos:

1. Calcular X [el factor de servicio, donde $X = T(T + U)$].

2. Determinar el valor de X en la tabla y luego hallar la línea de M (donde M es el número de canales de servicio).

3. Anotar los valores correspondientes de D y F.

4. Calcular $L, W, J, H,$ o cualquiera que sea necesario para medir el funcionamiento del sistema de servicio.

El Ejemplo D6 muestra estos pasos.

EJEMPLO D6

Modelo de población limitada

Datos del pasado indican que cada una de las 5 impresoras láser para computadora del Departamento de Energía de Estados Unidos en Washington DC necesita una reparación tras unas 20 horas de uso. Se ha establecido que las averías siguen una distribución de Poisson. El único técnico de servicio que hay puede reparar una impresora en un tiempo medio de 2 horas, siguiendo una distribución exponencial. El tiempo de inactividad de cada impresora cuesta 120 dólares por hora. Los técnicos cobran 25 dólares por hora. ¿Debería el Departamento de Energía contratar a un segundo técnico?

Suponiendo que el segundo técnico pueda reparar una impresora en una media de 2 horas, podemos utilizar la tabla de la Tabla D.8 (porque hay $N = 5$ máquinas en esta población limitada) para comparar los costes con uno o dos técnicos.



1. Primero, observamos que $T = 2$ horas y $U = 20$ horas.
2. Luego, $X = \dfrac{T}{T + U} = \dfrac{2}{2 + 20} = \dfrac{2}{22} = 0{,}091$ (cercano a 0,90).
3. Para $M = 1$ servidor, $D = 0{,}350$ y $F = 0{,}960$.
4. Para $M = 2$ servidores, $D = 0{,}44$ y $F = 0{,}998$.
5. El número medio de impresoras *en funcionamiento* es $J = NF(1 - X)$.
   Para $M = 1$, éste es $J = (5)(0{,}960)(1 - 0{,}91) = 4{,}36$.
   Para $M = 2$, éste es $J = (5)(0{,}998)(1 - 0{,}91) = 4{,}54$.
6. El análisis del coste es como sigue:

Número de técnicos	Número medio de impresoras averiadas ($N - J$)	Coste medio/hora por inactividad ($N - J$)(120$/hora)	Coste/hora de los técnicos (a 25$/hora)	Coste total/hora
1	0,64	76,80$	25,00$	101,80$
2	0,46	55,20$	50,00$	105,20$

Este análisis revela que con sólo un técnico de servicio se ahorrarán algunos dólares por hora (105,20$ − 101,80$ = 3,40 dólares).

[5] Existen tablas de colas finitas o limitadas para manejar poblaciones de llegada de hasta 250. Aunque no hay un número definido que podamos utilizar como línea divisoria entre poblaciones limitadas e ilimitadas, la convención general es la siguiente: si el número en la cola es una proporción significativa de la población que pueda llegar, se utiliza un modelo de cola de población limitada. Para un conjunto completo de valores *N, véase* L. G. Peck y R. N. Hazelwood, *Finite Queuing Tables* (Nueva York: John Wiley, 1958).

TABLA D8 ■ Tablas para colas finitas con una población de $N = 5$

X	*M*	*D*	*F*	*X*	*M*	*D*	*F*	*X*	*M*	*D*	*F*	*X*	*M*	*D*	*F*	*X*	*M*	*D*	*F*
0,012	1	0,048	0,999		1	0,404	0,945		1	0,689	0,801	0,330	4	0,012	0,999		3	0,359	0,927
0,019	1	0,076	0,998	0,110	2	0,065	0,996	0,210	3	0,032	0,998		3	0,112	0,986	0,520	2	0,779	0,728
0,025	1	0,100	0,997		1	0,421	0,939		2	0,211	0,973		2	0,442	0,904		1	0,988	0,384
0,030	1	0,120	0,996	0,115	2	0,071	0,995		1	0,713	0,783		1	0,902	0,583	0,540	4	0,085	0,989
0,034	1	0,135	0,995		1	0,439	0,933	0,220	3	0,036	0,997	0,340	4	0,013	0,999		3	0,392	0,917
0,036	1	0,143	0,994	0,120	2	0,076	0,995		2	0,229	0,969		3	0,121	0,985		2	0,806	0,708
0,040	1	0,159	0,993		1	0,456	0,927		1	0,735	0,765		2	0,462	0,896		1	0,991	0,370
0,042	1	0,167	0,992	0,125	2	0,082	0,994	0,230	3	0,041	0,997		1	0,911	0,569	0,560	4	0,098	0,986
0,044	1	0,175	0,991		1	0,473	0,920		2	0,247	0,965	0,360	4	0,017	0,998		3	0,426	0,906
0,046	1	0,183	0,990	0,130	2	0,089	0,933		1	0,756	0,747		3	0,141	0,981		2	0,831	0,689
0,050	1	0,198	0,989		1	0,489	0,914	0,240	3	0,046	0,996		2	0,501	0,880		1	0,993	0,357
0,052	1	0,206	0,988	0,135	2	0,095	0,993		2	0,265	0,960		1	0,927	0,542	0,580	4	0,113	0,984
0,054	1	0,214	0,987		1	0,505	0,907		1	0,775	0,730	0,380	4	0,021	0,998		3	0,461	0,895
0,056	2	0,018	0,999	0,140	2	0,102	0,992	0,250	3	0,052	0,995		3	0,163	0,976		2	0,854	0,670
	1	0,222	0,985		1	0,521	0,900		2	0,284	0,955		2	0,540	0,863		1	0,994	0,345
0,058	2	0,019	0,999	0,145	3	0,011	0,999		1	0,794	0,712		1	0,941	0,516	0,600	4	0,130	0,981
	1	0,229	0,984		2	0,109	0,991	0,260	3	0,058	0,994	0,400	4	0,026	0,977		3	0,497	0,883
0,060	2	0,020	0,999		1	0,537	0,892		2	0,303	0,950		3	0,186	0,972		2	0,875	0,652
	1	0,237	0,983	0,150	3	0,012	0,999		1	0,811	0,695		2	0,579	0,845		1	0,996	0,333
0,062	2	0,022	0,999		2	0,115	0,990	0,270	3	0,064	0,994		1	0,952	0,493	0,650	4	0,179	0,972
	1	0,245	0,982		1	0,553	0,885		2	0,323	0,944	0,420	4	0,031	0,997		3	0,588	0,850
0,064	2	0,023	0,999	0,155	3	0,013	0,999		1	0,827	0,677		3	0,211	0,966		2	0,918	0,608
	1	0,253	0,981		2	0,123	0,989	0,280	3	0,071	0,993		2	0,616	0,826		1	0,998	0,308
0,066	2	0,024	0,999		1	0,568	0,877		2	0,342	0,938		1	0,961	0,471	0,700	4	0,240	0,960
	1	0,260	0,979	0,160	3	0,015	0,999		1	0,842	0,661	0,440	4	0,037	0,996		3	0,678	0,815
0,068	2	0,026	0,999		2	0,130	0,988	0,290	4	0,007	0,999		3	0,238	0,960		2	0,950	0,568
	1	0,268	0,978		1	0,582	0,869		3	0,079	0,992		2	0,652	0,807		1	0,999	0,286
0,070	2	0,027	0,999	0,165	3	0,016	0,999		2	0,362	0,932		1	0,969	0,451	0,750	4	0,316	0,944
	1	0,275	0,977		2	0,137	0,987		1	0,856	0,644	0,460	4	0,045	0,995		3	0,763	0,777
0,075	2	0,031	0,999		1	0,597	0,861	0,300	4	0,008	0,999		3	0,266	0,953		2	0,972	0,532
	1	0,294	0,973	0,170	3	0,017	0,999		3	0,086	0,990		2	0,686	0,787	0,800	4	0,410	0,924
0,080	2	0,035	0,998		2	0,145	0,985		2	0,382	0,926		1	0,975	0,432		3	0,841	0,739
	1	0,313	0,969		1	0,611	0,853		1	0,869	0,628	0,480	4	0,053	0,994		2	0,987	0,500
0,085	2	0,040	0,998	0,180	3	0,021	0,999	0,310	4	0,009	0,999		3	0,296	0,945	0,850	4	0,522	0,900
	1	0,332	0,965		2	0,161	0,983		3	0,094	0,989		2	0,719	0,767		3	0,907	0,702
0,090	2	0,044	0,998		1	0,638	0,836		2	0,402	0,919		1	0,980	0,415		2	0,995	0,470
	1	0,350	0,960	0,190	3	0,024	0,998		1	0,881	0,613	0,500	4	0,063	0,992	0,900	4	0,656	0,871
0,095	2	0,049	0,997		2	0,117	0,980	0,320	4	0,010	0,999		3	0,327	0,936		3	0,957	0,666
	1	0,368	0,955		1	0,665	0,819		3	0,103	0,988		2	0,750	0,748		2	0,998	0,444
0,100	2	0,054	0,997	0,200	3	0,028	0,998		2	0,422	0,912		1	0,985	0,399	0,950	4	0,815	0,838
0,100	1	0,386	0,950	0,200	2	0,194	0,976		1	0,892	0,597	0,520	4	0,073	0,991		3	0,989	0,631
0,105	2	0,059	0,997																

Fuente: L. G. Peck y R. N. Hazelwood, *Finite Queuing Tables* (Nueva York: John Wiley, 1958): 4.

OTROS ENFOQUES DE LAS COLAS

Muchos de los problemas reales de líneas de espera que se dan en los servicios tienen características como las de los cuatro modelos matemáticos ya descritos. Sin embargo, a menudo, en un análisis se dan *variaciones* de estos casos específicos. Los tiempos de servicio en un taller de reparación de automóviles, por ejemplo, tienden a seguir una distribución de probabilidad normal en vez de una exponencial. Un sistema de matriculación en la Universidad, en el que los estudiantes más antiguos tienen preferencia para elegir las clases y horarios sobre otros estudiantes, es un ejemplo de modelo del primero que llega, primero servido, con una disciplina de cola de prioridad preferente. Un examen médico de militares reclutas es un ejemplo de sistema multifase, distinto de los modelos de fase única analizados anteriormente en este módulo. Un recluta primero hace cola en un puesto para que le saquen sangre, luego espera en el puesto siguiente para una prueba oftalmológica, habla con un psiquiatra en el tercero y es examinado de sus problemas médicos por un doctor en el cuarto puesto. En cada fase, el recluta debe colocarse en otra cola y esperar su turno. Muchos modelos, algunos muy complejos, han sido desarrollados para hacer frente a situaciones como éstas. Una de estas situaciones se describe en el recuadro sobre *Dirección de producción en acción* titulado "Acortar los tiempos de comparecencia ante el juez en el departamento de policía de Nueva York".

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

ACORTAR LOS TIEMPOS DE COMPARECENCIA ANTE EL JUEZ EN EL DEPARTAMENTO DE POLICÍA DE NUEVA YORK

En cierta época, las personas arrestadas en Nueva York tenían que esperar una media de 40 horas (algunas más de 70 horas) hasta su comparecencia ante el juez. Se las mantenía en unas instalaciones de detención abarrotadas, ruidosas, estresantes, insalubres y a menudo peligrosas, y, a efectos prácticos, se les denegaba una comparecencia rápida ante el tribunal. El Tribunal Supremo de Nueva York dispuso desde entonces que la ciudad debía tratar de organizar las comparecencias dentro de las 24 primeras horas de detención, o de lo contrario poner a los detenidos en libertad.

El proceso de "detención a comparecencia" (*arrest-to-arraignment,* ATA), que posee las características generales de un gran sistema de colas, comprende los siguientes pasos: detención del sospechoso del delito, transporte a dependencias policiales, cacheo/toma de huellas, papeleos de la detención, transporte a unas instalaciones centrales de registro, más papeleo, proceso de las huellas dactilares, entrevista para la fianza, transporte a la sala de justicia o a una dependencia adyacente, comprobación de antecedentes y, finalmente, un ayudante del fiscal de distrito redacta un documento de acusación.

Para resolver el complejo problema de mejorar este sistema, la ciudad contrató a Queues Enforth Development, Inc., una empresa consultora de Massachusetts. La empresa hizo una simulación de Montecarlo del proceso ATA que incluía modelos de cola de un único servidor y de múltiples servidores. El enfoque de modelización redujo el tiempo medio del proceso ATA a 24 horas y produjo un ahorro de costes de 9,5 millones de dólares para la ciudad y el Estado.

Fuente: R. C. Larson, M. F. Cahn, y M. C. Shell. "Improving the New York Arrest-to-Arraignment System", *Interfaces* 23, n.º 1 (enero-febrero de 1993): 76-96.

RESUMEN

Las colas son una parte importante del mundo de la dirección de operaciones. En este módulo describimos varios sistemas de colas habituales y presentamos modelos matemáticos para analizarlos.

Los modelos de colas más ampliamente utilizados son el modelo A, el sistema básico de canal único y fase única con llegadas siguiendo una distribución de Poisson y tiempos de servicio exponenciales; el modelo B, el equivalente multicanal del modelo A; el modelo C, un modelo de tasa de servicio constante; y el modelo D, un sistema de población limitada. Los cuatro modelos suponen que las llegadas siguen una distribución de Poisson, que se da un servicio del tipo primero que entra, primero que sale, y una fase de servicio única. Las típicas características operativas que examinamos son el tiempo medio en la cola de espera y en el sistema, número medio de clientes en la cola y en el sistema, y la tasa de utilización.

Existen diversos modelos para los que no tienen por qué cumplirse todos los supuestos de los modelos tradicionales. En estos casos, utilizamos modelos matemáticos más complejos o recurrimos a una técnica llamada *simulación*. La aplicación de la simulación a los problemas de los sistemas de colas se trata en el Módulo Cuantitativo F.



Teoría de colas *(p. 402)*
Línea de espera (cola) *(p. 402)*
Población ilimitada o infinita *(p. 403)*
Población limitada o finita *(p. 403)*
Distribución de Poisson *(p. 404)*
Regla del primero que entra, primero que sale (FIFO) *(p. 405)*
Sistema de cola de canal único *(p. 405)*
Sistema de cola de múltiples canales *(p. 405)*
Sistema de fase única *(p. 406)*
Sistema multifase *(p. 406)*
Distribución de probabilidad exponencial negativa *(p. 407)*

CÓMO UTILIZAR EL SOFTWARE PARA RESOLVER PROBLEMAS DE COLAS

Tanto Excel OM como POM para Windows pueden utilizarse para analizar todos los problemas de este módulo, menos los dos últimos.



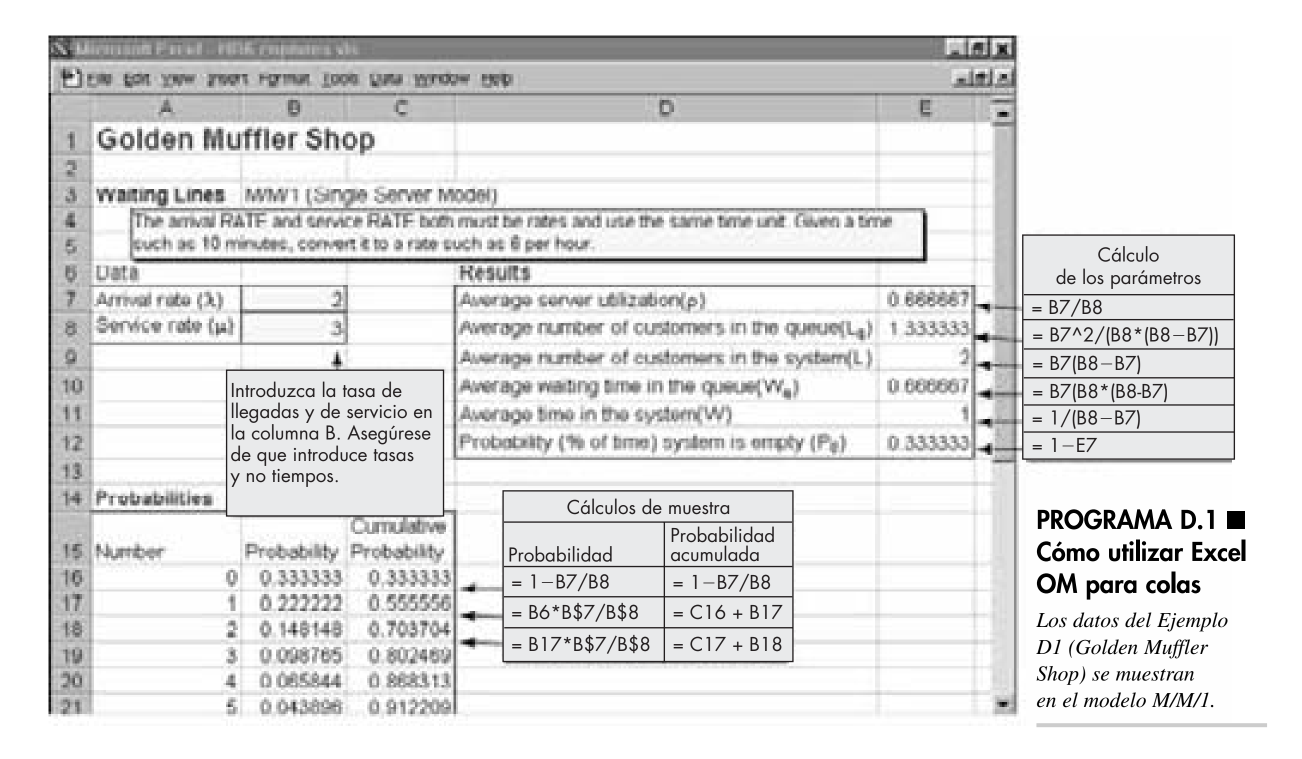
Cómo utilizar Excel OM

El programa de Líneas de Espera de Excel OM resuelve los cuatro modelos desarrollados en este módulo. El Programa D1 ilustra nuestro primer modelo, el sistema M/M/1, a partir de los datos del Ejemplo D1.



Cómo utilizar POM para Windows para las colas

Existen diferentes modelos de colas en POM para Windows entre los que elegir para este módulo de líneas de espera. El programa puede incluir un análisis económico de los datos de costes y, opcionalmente, puede mostrar las probabilidades de diferentes números de personas/artículos en el sistema. *Véase* el Apéndice IV para más detalles.



PROGRAMA D.1 ■ Cómo utilizar Excel OM para colas

Los datos del Ejemplo D1 (Golden Muffler Shop) se muestran en el modelo M/M/1.

PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto D.1

Actualmente, Sid Das Brick Distributors tiene contratado a un trabajador cuya tarea es cargar ladrillos en los camiones de la empresa para su distribución. Llega una media de 24 camiones al día, o 3 por hora, a la plataforma de carga, siguiendo una distribución de Poisson. El trabajador los carga a un ritmo de 4 camiones por hora, siguiendo aproximadamente una distribución exponencial en sus tiempos de servicio.

Das cree que añadiendo un segundo empleado para cargar ladrillos mejorará sustancialmente la productividad de la empresa. Estima que un equipo de dos personas en la dársena de carga duplicará el ritmo de carga, de 4 a 8 camiones por hora. Analice el efecto en la cola de este cambio y compare los resultados con los conseguidos con un solo empleado. ¿Cuál es la probabilidad de que haya más de 3 camiones ya estén cargándose o en espera?

Solución

	Número de cargadores de ladrillos	
	1	2
Ritmo de llegada de camiones (λ)	3/hora	3/hora
Ritmo de carga (μ)	4/hora	8/hora
Número medio en el sistema (L_s)	3 camiones	0,6 camiones
Tiempo medio en el sistema (W_s)	1 hora	0,2 horas
Número medio en la cola (L_q)	2,25 camiones	0,225 camiones
Tiempo medio en la cola (W_q)	0,75 horas	0,075 horas
Ritmo de utilización (ρ)	0,75	0,375
Probabilidad de sistema vacío (P_0)	0,25	0,625

Posibilidad de más de *k* camiones en el sistema

	Probabilidad $n > k$	
k	**Un cargador**	**Dos cargadores**
0	0,75	0,375
1	0,56	0,141
2	0,42	0,053
3	0,32	0,020

Estos resultados indican que cuando sólo hay un empleado, un camión tiene que esperar, de media, tres cuartos de hora antes de ser cargado. Además, hay una media de 2,25 camiones esperando en la cola para ser cargados. Esta situación puede ser inaceptable para la dirección. Observe también la reducción del tamaño de la cola después de añadir un segundo cargador.

Problema Resuelto D.2

Los conductores de camiones que trabajan para Sid Das (*véase* el Problema Resuelto D.1) ganan una media de 10 dólares por hora. Los cargadores de ladrillos reciben unos 6 dólares por hora. Los conductores de camiones que esperan *en la cola o en la dársena de carga* están ganando un salario pero son productivamente inactivos e incapaces de generar ingresos durante ese tiempo. ¿Cuál sería el ahorro de costes *por hora* para la empresa si contratase a 2 cargadores en lugar de 1?

Remitiéndonos a los datos del Problema Resuelto D.1, observamos que el número medio de camiones *en el sistema* es de 3 cuando hay sólo 1 cargador y 0,6 cuando hay 2 cargadores.

Solución

	Número de cargadores de ladrillos	
	1	2
Coste del tiempo de inactividad de los camioneros [(número medio de camiones) × (precio por hora)] = (3)(10$) =	30$	6$ = (0,6)(10$)
Costes de carga	6	12 = (2)(6$)
Coste total estimado por hora	36$	18$

La empresa se ahorrará 18 dólares por hora si añade un segundo cargador.

Problema Resuelto D.3

Sid Das está pensando en construir una segunda dársena o muelle para acelerar el proceso de carga de camiones. Cree que este sistema será todavía más eficiente que simplemente contratar a otro cargador para ayudar en la primera dársena (como en el Problema Resuelto D.1).

Supongamos que los trabajadores en cada dársena podrán cargar 4 camiones por hora cada uno y que los camiones seguirán llegando al ritmo de 3 por hora. A continuación aplicamos las ecuaciones apropiadas para hallar las nuevas condiciones operativas de la línea de espera. ¿Es este nuevo enfoque verdaderamente más rápido que los otros dos que ha considerado Das?

Solución

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{1} \frac{1}{n!}\left(\frac{3}{4}\right)^n\right] + \frac{1}{2!}\left(\frac{3}{4}\right)^2 \frac{2(4)}{2(4) - 3}}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{3}{4} + \frac{1}{2}\left(\frac{3}{4}\right)^2\left(\frac{8}{8-3}\right)} = 0{,}454$$

$$L_s = \frac{3(4)(3/4)^2}{(1)!(8-3)^2}(0{,}4545) + \frac{3}{4} = 0{,}873$$

$$W_s = \frac{0{,}873}{3} = 0{,}291 \text{ horas}$$

$$L_q = 0{,}873 - 3/4 = 0{,}123$$

$$W_q = \frac{0{,}123}{3} = 0{,}041 \text{ horas}$$

Volviendo al Problema Resuelto D1, vemos que aunque la longitud de la *cola* y el tiempo medio en la cola son menores cuando se abre una segunda dársena, el número medio de camiones en el *sistema* y el tiempo medio empleado en el sistema son menores cuando se emplean dos trabajadores en una dársena *única*. Así pues, seguramente recomendaríamos no construir una segunda dársena.

Problema Resuelto D.4

La unidad de cardiología del hospital de St. Elsewhere tiene 5 camas, que están casi siempre ocupadas por pacientes que acaban de ser operados del corazón. Hay dos enfermeras empleadas en el servicio de la unidad de cardiología en cada uno de los 3 turnos de 8 horas. Cada 2 horas aproximadamente (según una distribución de Poisson), uno de los pacientes necesita la atención de una de las enfermeras. La enfermera empleará entonces una media de 30 minutos (distribuidos exponencialmente) atendiendo al paciente y actualizando los informes médicos sobre el problema y el servicio proporcionado.

Dado que la atención inmediata es crítica para los 5 pacientes, las dos preguntas importantes son: ¿Cuál es el número medio de pacientes que están siendo atendidos por las enfermeras? ¿Cuál es el tiempo medio que un paciente pasa esperando a que llegue una enfermera?

Solución

N = 5 pacientes

M = 2 enfermeras

T = 30 minutos

U = 120 minutos

$$X = \frac{X}{T + U} = \frac{30}{30 + 120} = 0{,}20$$

De la Tabla D.8, con $X = 0{,}20$ y $M = 2$, vemos que

$F = 0{,}976$

H = número medio de pacientes que están siendo atendidos

$= FNX = (0{,}976)(5)(0{,}20) = 0{,}98 \approx 1$ paciente

W = tiempo medio de espera para una enfermera $= \dfrac{T(1 - F)}{XF}$

$$= \frac{30(1 - 0{,}976)}{(0{,}20)(0{,}976)} = 3{,}69 \text{ minutos}$$

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.

 En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Problemas en Internet
- Caso de estudio en Internet

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Excel OM
- Archivo de datos para el ejemplo de Excel OM
- POM para Windows

CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. Enumere las tres partes de un típico sistema de colas.
2. Cuando se diseña un sistema de colas, ¿qué cuestiones "cualitativas" hay que tener en cuenta?
3. Nombre los tres factores que determinan la estructura de las "llegadas" en un sistema de colas.
4. Enumere las siete medidas habituales de rendimiento en un sistema de colas.
5. Defina las hipótesis del modelo "básico" de colas de un único canal (Modelo A o M/M/1).
6. ¿Es bueno o malo que la panadería de un supermercado funcione según el sistema de primero en llegar, primero en ser atendido? ¿Por qué?
7. Describa lo que se quiere decir en el contexto de las colas con *renunciar* y *desistir*. Ofrezca un ejemplo de cada caso.
8. ¿Cuál es mayor, W_s o W_q? Explique su respuesta.
9. Describa brevemente tres situaciones en que no se pueda aplicar la disciplina FIFO (primero en llegar, primero en salir) en el análisis de las colas.
10. Describa el comportamiento de la cola donde $\lambda > \mu$. Utilice tanto el análisis como la intuición.
11. Analice el probable resultado de un sistema de colas donde $\lambda > \mu$, pero sólo en una pequeña cantidad (por ejemplo, $\mu = 4{,}1$, $\lambda = 4$).
12. Ofrezca ejemplos de cuatro situaciones en las que hay una cola limitada o finita.
13. ¿Cuáles son los elementos de los siguientes sistemas de colas? Dibuje y explique la configuración de cada uno de ellos.

    a) Peluquería.
    b) Lavado de automóviles.
    c) Lavandería.
    d) Pequeña tienda de ultramarinos.

14. ¿Tienen las consultas de los médicos tasas de llegadas de pacientes aleatorias habitualmente? ¿Son aleatorios los tiempos del servicio? ¿En qué circunstancias podría ser constante el tiempo de servicio?
15. ¿Qué ocurre si dos sistemas de canal único tienen la misma tasa media de llegadas y de servicio, pero el tiempo del servicio es constante en uno y exponencial en el otro?
16. ¿Qué valor, en dólares, asigna a sus horas de espera en una cola? ¿Qué valor asignan sus compañeros de clase a las suyas? ¿Por qué difieren los valores?

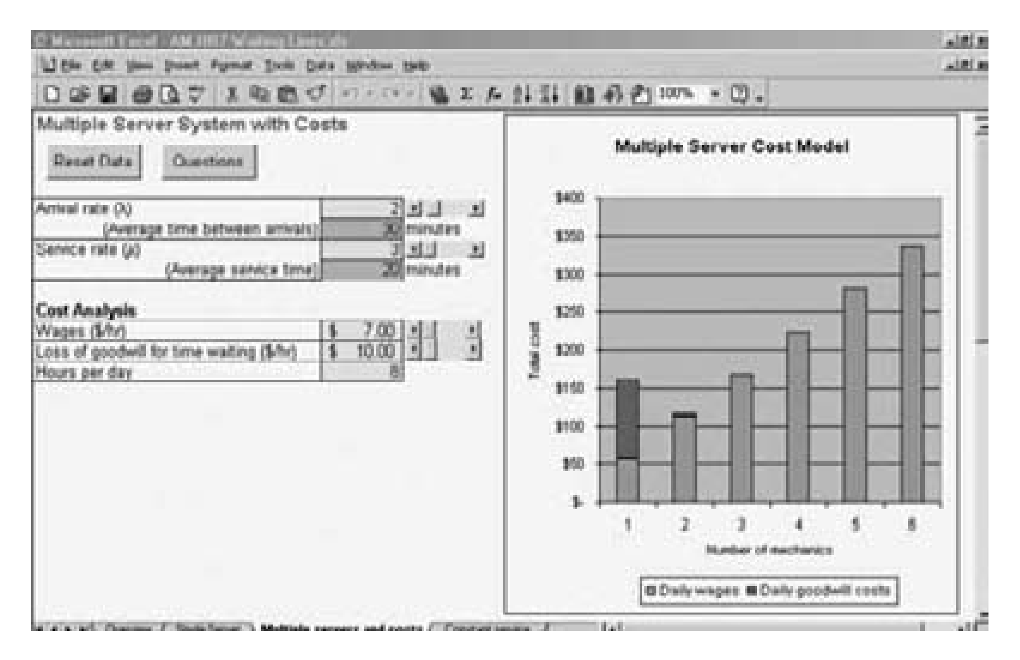


EJERCICIO ACTIVE MODEL

En este ejemplo Active Model podemos examinar la relación entre tasas de llegadas y servicio, y costes y número de servidores. Los dos primeros inputs del modelo son las tasas de llegada y de servicio, en clientes por hora. También se muestra el tiempo medio entre llegadas y tiempo de servicio, pero no altere estas dos cifras que están sombreadas en oscuro (30 minutos y 20 minutos, respectivamente).

Preguntas

1. ¿Qué número de mecánicos da el menor coste diario total? ¿Cuál es el coste diario total mínimo?
2. Utilice la barra de desplazamiento sobre la tasa de llegadas. ¿Cuál debería ser la tasa de llegadas para que se necesitara un tercer mecánico?
3. Utilice la barra de desplazamiento sobre el coste de reputación (*goodwill*) y calcule el intervalo de costes de reputación para el que tendría exactamente un mecánico. ¿Y dos mecánicos?
4. ¿De qué cuantía debería ser el salario para que un mecánico fuera la opción más barata?



ACTIVE MODEL D.2 ■ Un análisis de Golden Muffler Shop (Ejemplos D1-D3) con los costes como variable

5. Si se añade un segundo mecánico, ¿es más barato tener dos mecánicos que trabajen por separado o tener dos mecánicos que trabajen como un único equipo con una tasa de servicio que es el doble de rápida?



PROBLEMAS*

•  **D.1.** Los clientes llegan a la peluquería Paul Harrold's Styling Shop a una tasa de 3 por hora, distribuidos según una distribución de Poisson. Paul puede hacer cortes de pelo a un ritmo de 5 por hora, distribuidos exponencialmente.

a) Calcule el número medio de clientes que espera un corte de pelo.
b) Calcule el número medio de clientes en la peluquería.
c) Calcule el tiempo medio que un cliente espera hasta que le llega su turno.
d) Calcule el tiempo medio que pasa un cliente en la peluquería.
e) Calcule el porcentaje de tiempo que Paul está ocupado.

•  **D.2.** Sólo hay una fotocopiadora en la sala de estudio de la escuela de negocios. Los estudiantes llegan a una tasa de $\lambda = 40$ por hora (según una distribución de Poisson). El fotocopiado lleva una media de 40 segundos, o $\mu = 90$ por hora (según una distribución exponencial). Calcule:

---

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; ✗ significa que se puede resolver el problema con Excel OM; **P**✗ significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

a) El porcentaje de tiempo que la máquina está en uso.
b) La longitud media de la cola.
c) El número medio de estudiantes en el sistema.
d) El tiempo medio de espera en la cola.
e) El tiempo medio en el sistema.

• P **D.3.** Glen Schmidt posee y dirige un puesto de refrescos y perritos calientes cerca del campus universitario de Georgeville. Aunque Glen puede atender a 30 clientes por hora (μ), sólo recibe 20 clientes por hora (λ). Puesto que Glen podría esperar a un 50 por ciento más de clientes de los que acuden actualmente a su puesto, no tiene sentido para él tener líneas de espera.

Glen le contrata para analizar la situación y determinar algunas características de su cola. Tras analizar el problema, considera que cumple las seis condiciones de una cola de canal único (como en el Modelo A). ¿Cuáles son sus conclusiones?

• P **D.4.** Sam Certo, el veterinario de Longwood, dirige una clínica de vacunación contra la rabia para perros en la escuela elemental de su localidad. Sam puede "pinchar" a un perro cada 3 minutos. Se estima que los perros llegarán independientemente y aleatoriamente a lo largo del día a un ritmo de un perro cada 6 minutos, siguiendo una distribución de Poisson. Se supone también que los tiempos de vacunación de Sam están distribuidos exponencialmente. Calcule:

a) La probabilidad de que Sam esté inactivo.
b) La proporción del tiempo en que Sam está ocupado.
c) El número medio de perros que están siendo vacunados y esperando a ser vacunados.
d) El número medio de perros esperando a ser vacunados.
e) El tiempo medio que un perro espera hasta ser vacunado.
f) La cantidad media de tiempo que un perro pasa esperando en la cola y siendo vacunado.

: P **D.5.** La farmacia del Hospital Arnold Palmer recibe 12 peticiones de recetas cada hora, con una distribución de Poisson. Los empleados necesitan un tiempo medio de 4 minutos para servir cada una, con una distribución exponencial negativa.

a) ¿Cuál es el número de unidades en el sistema (tiempo de espera más tiempo de servicio)?
b) ¿Cuánto tiempo estará la receta típica (media) en el sistema (tiempo de espera más tiempo de servicio)?
c) ¿Cuál es el número medio de recetas en la cola?

• P **D.6.** Las llamadas llegan a la centralita del hotel de James Hamann a un ritmo de 2 por minuto. El tiempo medio para gestionar cada llamada es de 20 segundos. Sólo hay un operador en la centralita actualmente. Las distribuciones de Poisson y exponenciales parecen ser adecuadas en esta situación.

a) ¿Cuál es la probabilidad de que el operador esté ocupado?
b) ¿Cuál es el tiempo medio que una llamada tiene que esperar antes de que sea atendida por el operador?
c) ¿Cuál es el número medio de llamadas esperando a ser atendidas?

D.7. Los automóviles llegan a la ventanilla de un autoservicio de correo de Urbana, Illinois, a una tasa de 4 cada 10 minutos. El tiempo medio de servicio es de 2 minutos. La tasa de llegadas sigue una distribución de Poisson y el tiempo del servicio se distribuye exponencialmente.

a) ¿Cuál es el tiempo medio que pasa un automóvil en el sistema?
b) ¿Cuál es el número medio de automóviles en el sistema?
c) ¿Cuál es el número medio de automóviles esperando a recibir el servicio?
d) ¿Cuál es el tiempo medio que pasa un automóvil en la cola?
e) ¿Qué probabilidad hay de que no haya ningún automóvil en la ventanilla?
f) ¿Qué porcentaje del tiempo está ocupado el empleado de correos?
g) ¿Qué probabilidad hay de que haya exactamente 2 automóviles en el sistema.

D.8. La empresa Tara Yazinski Electronics Corporation mantiene un equipo de servicio para reparar averías de máquinas que se producen con una media de $\lambda = 3$ al día (aproximadamente de tipo Poisson). El equipo puede atender una media de $\mu = 8$ máquinas al día, con una distribución del tiempo de reparación que se asemeja a la exponencial.

a) ¿Cuál es la tasa de utilización de este sistema de servicio?
b) ¿Cuál es el tiempo medio de inactividad de una máquina averiada?
c) ¿Cuántas máquinas están esperando a ser reparadas en un instante dado?
c) ¿Cuál es la probabilidad de que más de una máquina esté en el sistema? ¿La probabilidad de que más de dos estén rotas y esperando a ser reparadas o siendo atendidas? ¿Más de tres? ¿Más de cuatro?

D.9. Zimmerman's Bank es el único banco de la pequeña ciudad de St. Thomas. En un viernes normal llega al banco una media de 10 clientes por hora para llevar a cabo transacciones. Hay un cajero en el banco, y el tiempo medio para realizar una transacción es de 4 minutos. Se puede describir el tiempo de servicio mediante una distribución exponencial. Se utiliza una única línea de espera, y el cliente situado al principio de la cola irá al primer cajero disponible. Si se utiliza un único cajero, calcule:

a) El tiempo medio en la cola.
b) El número medio de personas en la cola.
c) El tiempo medio en el sistema.
d) El número medio de personas en el sistema.
e) La probabilidad de que el banco esté vacío.
f) Zimmerman está analizando la posibilidad de poner a un segundo cajero (que trabajaría al mismo ritmo que el primero) para reducir el tiempo de espera de los clientes. Supone que esto recortará el tiempo de espera a la mitad. Si se añade un segundo cajero, responda a los apartados anteriores.

D.10. Valerie Fondl dirige un complejo de multicines llamado Cinema I, II, III y IV en Columbus, Ohio. Cada una de las 4 salas proyecta una película diferente; la programación escalona las horas de comienzo de cada película para evitar las multitudes que se formarían si las 4 películas empezasen al mismo tiempo. El cine tiene una taquilla única con un cajero que puede mantener una tasa media de servicio de 280 clientes por hora. Se supone que los tiempos de servicio siguen una distribución exponencial. Las llegadas en un día normalmente activo se distribuyen según Poisson y tienen una media de 210 por hora.

Para determinar la eficacia de la actual operación de venta de entradas, Valerie desea examinar varias características de funcionamiento de la cola.

a) Calcule el número medio de espectadores que esperan en la cola para sacar entradas.
b) ¿Qué porcentaje del tiempo está ocupado el cajero?
c) ¿Cuál es el tiempo medio que un cliente pasa en el sistema?
d) ¿Cuál es el tiempo medio de espera en la cola hasta llegar a la ventanilla?
e) ¿Cuál es la probabilidad de que haya más de dos personas en el sistema? ¿Y más de tres personas? ¿Y más de cuatro?

: P **D.11.** Bill Youngdahl ha estado recopilando datos en el grill para alumnos de la TU. Ha comprobado que entre las cinco y las siete de la tarde llegan alumnos a un ritmo de 25 por hora (con una distribución de Poisson) y el servicio tarda una media de 2 minutos (distribución exponencial). Únicamente hay un camarero, que sólo puede ocuparse de un pedido de cada vez.

a) ¿Cuál es el número medio de alumnos que esperan en la cola?
b) ¿Que tiempo medio pasa un alumno en el área del grill?
c) Suponga que se puede añadir un segundo camarero para trabajar en equipo con el primero (y funcionar como si, de hecho, fuera un solo camarero más rápido). Esto reduciría el tiempo medio de servicio a 90 segundos. ¿Cómo afectaría al tiempo medio que pasa un alumno en el área del grill?
d) Suponga que se incorpora un segundo camarero y que ambos actúan de forma independiente, tardando *cada uno* una media de 2 minutos. ¿Cuál sería el tiempo medio que pasaría un alumno en el sistema?

⋮ P **D.12.** La temporada de la cosecha en el medio oeste americano es corta, y los granjeros entregan sus cosechas de trigo en un gigantesco almacén central en un periodo de 2 semanas. Debido a esto, los camiones llenos de trigo que esperan a descargar y regresar al campo han llegado a formar colas que ocupaban toda la calle del almacén de recepción. El almacén es de propiedad cooperativa, y a los granjeros les interesa que el proceso de descarga/almacenado sea lo más eficiente posible. El coste del deterioro del grano causado por los retrasos en la descarga y el coste de alquiler de los camiones y del tiempo de inactividad del conductor son preocupaciones importantes para los miembros de la cooperativa. Aunque les resulta difícil valorar los daños en la cosecha, es fácil asignar un coste de espera y descarga por camión y conductor de 18 dólares por hora. Durante las 2 semanas que dura la temporada de cosecha, el almacén está abierto y funciona 16 horas al día, 7 días a la semana, y pueden descargar 35 camiones por hora siguiendo una distribución exponencial. Los camiones llenos llegan todo el día (durante las horas que el almacén está abierto) a un ritmo de unos 30 por hora, siguiendo una distribución de Poisson.

Para ayudar a la cooperativa a controlar el problema del tiempo perdido mientras los camiones están esperando en la cola o descargando en el almacén, calcule:

a) El número medio de camiones en el sistema de descarga.
b) El tiempo medio de un camión en el sistema.
c) La tasa de utilización del área de almacén.
d) La probabilidad de que haya más de tres camiones en el sistema en cualquier momento dado.
e) El coste total diario para los granjeros por tener sus camiones inmovilizados en el proceso de descarga.

f) Como se indicó, la cooperativa utiliza el almacén intensamente sólo 2 semanas al año. Los granjeros calculan que ampliar el almacén recortaría en un 50 por ciento los costes de descarga del año próximo. Costará unos 9.000 dólares hacer la ampliación fuera de temporada. ¿Merecería la pena el gasto de ampliar el almacén?

D.13. La tienda de ropa de Radovilsky en Haywood, California, mantiene un próspero departamento de ventas por catálogo en el que un empleado toma los pedidos por teléfono. Si el empleado está ocupado atendiendo el teléfono, las llamadas entrantes para la venta por catálogo son atendidas automáticamente por un contestador que les pide que esperen. En cuanto el empleado está libre, la llamada que haya esperado más tiempo es transferida y atendida primero. Las llamadas entran a un ritmo de 12 por hora. El empleado puede tomar un pedido en una media de 4 minutos. Las llamadas tienden a seguir una distribución de Poisson, y los tiempos de servicio tienden a ser exponenciales.

El coste del empleado es de 10 dólares por hora, pero debido a la pérdida de clientela y de ventas, Radovilsky pierde unos 25 dólares por hora como consecuencia del tiempo que el cliente espera para que el empleado le tome el pedido.

a) ¿Qué tiempo medio tienen que esperar los clientes antes de que sus llamadas sean transferidas al empleado de los pedidos?
b) ¿Cuál es el número medio de clientes esperando a hacer un pedido?
c) Radovilsky está analizando la posibilidad de poner un segundo empleado para atender llamadas. El coste para la tienda de este empleado sería el mismo: 10 dólares por hora. ¿Debería contratar a otro empleado? Explique su decisión.

D.14. Los clientes llegan a una máquina expendedora de café a un ritmo de cuatro por minuto, siguiendo una distribución de Poisson. La máquina de café dispensa tazas de café en un tiempo constante de 10 segundos.

a) ¿Cuál es el número medio de personas que esperan en la cola?
b) ¿Cuál es el número medio en el sistema?
c) ¿Cuánto tiempo tiene que esperar de promedio una persona antes de conseguir su café?

D.15. La típica estación de metro de Washington DC tiene seis tornos, y el director de la estación puede gestionar cada uno para utilizarlo como control de entrada o de salida, pero nunca los dos a la vez. El director debe decidir, a distintas horas del día, cuántos tornos tiene que utilizar para los pasajeros que entran y cuántos para los que salen.

En la estación de la Universidad de George Washington (GWU), los pasajeros entran en la estación a un ritmo de unos 84 por minuto entre las siete y las nueve de la mañana. Los pasajeros que salen de los trenes en esta parada llegan a la zona de tornos de salida a un ritmo de unos 48 por minuto durante las mismas horas punta de la mañana. Cada torno permite que entren o salgan una media de 30 pasajeros por minuto. Se considera que las llegadas y los tiempos de servicio siguen una distribución de Poisson y exponencial respectivamente. Suponga que los pasajeros forman una cola común tanto en la zona de los tornos de entrada como en la de los de salida y pasan por el primer torno disponible.

El director de la estación GWU, Ernie Forman, no quiere que el pasajero medio de su estación tenga que esperar en la cola del torno más de 6 segundos, ni quiere que haya más de 8 personas en una cola en un momento cualquiera.

a) ¿Cuántos tornos deben abrirse en cada dirección cada mañana?

b) Analice los supuestos que subyacen en la solución de este problema utilizando la teoría de colas.

D.16. El lavado de automóviles de Yvette Freeman emplea un tiempo constante de 4,5 minutos en cada ciclo de lavado. Los automóviles llegan siguiendo una distribución de Poisson a un ritmo de 10 por hora. Yvette quiere saber:

a) El tiempo medio de espera en la cola.
b) La longitud media de la cola.

D.17. El taller de fabricación de armarios expositores de Eric Krassow, en Memphis, tiene cinco máquinas herramienta que automatizan la perforación de los agujeros para instalar las bisagras. Estas máquinas tienen que ser configuradas para cada pedido de armarios. Los pedidos parecen seguir una distribución de Poisson, con una media de 3 por jornada de ocho horas. Hay un único técnico para preparar las máquinas. Sus tiempos de servicio son exponenciales, con una media de 2 horas para cada una.

a) ¿Cuál es el factor de servicio de este sistema?
b) ¿Cuál es el número medio de máquinas en servicio?
c) ¿Qué consecuencias tendría sobre el número de máquinas en servicio el hecho de disponer de un segundo técnico?

D.18. Dos técnicos, trabajando por separado, controlan un grupo de 5 computadoras que gestionan una instalación de fabricación automatizada. Se necesita un tiempo medio de 15 minutos (distribuidos exponencialmente) para ajustar una computadora que ha tenido un problema. Las computadoras funcionan una media de 85 minutos (distribución de Poisson) sin necesitar ajustes. Determine:

a) El número medio de computadoras que esperan a ser ajustadas.
b) El número medio de computadoras que se están ajustando.
c) El número medio de computadoras que no están en funcionamiento.

D.19. Un mecánico atiende 5 taladradoras en una fábrica de planchas de acero. Las máquinas se averían a una media de una vez cada 6 días laborables, y las averías tienden a seguir una distribución de Poisson. El mecánico puede realizar en promedio una reparación al día. Las reparaciones siguen una distribución exponencial.

a) En promedio, ¿cuántas máquinas esperan a ser reparadas?
b) En promedio, ¿cuántos taladros están en funcionamiento?
c) ¿Cuánto se reduciría el tiempo de espera si se contratase a un segundo mecánico?

D.20. El administrador de la sala de urgencias de un gran hospital se enfrenta al problema de dar tratamiento a los pacientes que llegan con diferente frecuencia durante el día. Hay 4 médicos disponibles para tratar a los pacientes cuando es necesario. De lo contrario, pueden ser asignados a otras responsabilidades (como hacer pruebas de laboratorio, informes, diagnósticos de rayos X) o incluso reprogramados y asignados a otras horas de servicio.

Es importante proporcionar tratamiento rápido y adecuado, y el administrador piensa que, de media, los pacientes no deberían tener que sentarse en la sala de espera más de 5 minutos antes de ser examinados por un médico. Los pacientes son tratados sobre la base del primero que llega, primero en ser atendido, y los visita el primer médico disponible después de esperar en la cola. El patrón de llegadas en un día normal es el siguiente:

Hora	Ritmo de llegada
9 a.m.-3 p.m.	6 pacientes/hora
3 p.m.-8 p.m.	4 pacientes/hora
8 p.m.-medianoche	12 pacientes/hora

Las llegadas siguen una distribución de Poisson y los tiempos de tratamiento, 12 minutos de promedio, siguen una distribución exponencial.

¿Cuántos médicos deberían estar de servicio durante cada periodo para mantener el nivel esperado de servicio al paciente?

⋮ **D.21.** La tienda de muebles Chattanooga Furniture recibe una media de 50 clientes por turno. Marilyn Helms, la directora, quiere calcular si debería contratar a 1, 2 3 o 4 vendedores. Ha estimado que el tiempo de espera medio será de 7 minutos con un vendedor, 4 minutos con dos vendedores, 3 minutos con tres vendedores y 2 minutos con cuatro vendedores. Ha estimado el coste por minuto de espera de un cliente en un dólar. El coste por vendedor, por turno (incluyendo prestaciones adicionales), asciende a 70 dólares.

¿Cuántos vendedores hay que contratar?

⋮ **D.22.** Recoja datos reales de llegadas y servicio en cualquier lugar del campus o en algún otro sitio de los alrededores (quizá un banco, una peluquería, tren de lavado, restaurante de comida rápida, etcétera). Luego conteste a las siguientes preguntas:

a) Determine las distribuciones de las llegadas y los tiempos de servicio (dibuje un gráfico con ambos).
b) ¿Las llegadas y los servicios siguieron las distribuciones comentadas en el texto? (Dibuje un gráfico con esas distribuciones en el mismo gráfico que sus datos de campo).
c) ¿Qué modelo de cola siguió su cola “real”?
d) Calcule la longitud media de la cola.
e) Calcule el número medio de clientes en el sistema.



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: D.23 a D.31.

■ *Caso de estudio* ■

New England Foundry

Durante más de 75 años, New England Foundry, Inc. (NEFI), ha fabricado estufas de leña para uso doméstico. Recientemente, con el incremento de los precios de la energía, el presidente George Mathison ha visto cómo se triplicaban las ventas. Este espectacular aumento ha puesto las cosas difíciles a George para mantener la calidad de todas sus estufas de leña y productos relacionados con ellas.

Al contrario que otras empresas fabricantes de estufas de leña, NEFI *sólo* se dedica a fabricar estufas y

productos relacionados con ellas. Sus principales productos son la Warmglo I, la Warmglo II, la Warmglo III y la Warmglo IV. La Warmglo I es la estufa de leña más pequeña, con una producción de calor de 20.000 BTU (unidad térmica británica), y la Warmglo IV es la más grande, con una producción calorífica de 60.000 BTU.

La Warmglo III aventaja en ventas a todos los demás modelos por un amplio margen. Su producción de calor y accesorios disponibles eran ideales para el típico hogar. La Warmglo III también tenía una serie de características sobresalientes que hacían de ella una de las estufas más atractivas y eficientes caloríficamente que había en el mercado. Estas características, junto con los accesorios, dieron como resultado una expansión de las ventas y animaron a George a construir una nueva fábrica para producir el modelo Warmglo III. Se muestra un diagrama general de la fábrica en la Figura D.6.

La nueva fundición utilizaba el más moderno equipamiento, incluyendo un nuevo Disamatic que ayudaba a fabricar las piezas de la estufa. Aparte de los nuevos equipos o procedimientos, las operaciones de fundición habían sido las mismas durante cientos de años. Para empezar, se hace un molde de madera para cada pieza de hierro fundido de la estufa. El molde de madera es un duplicado exacto de la pieza de hierro fundido que debe ser fabricada. Todos los moldes de NEFI están hechos por Precision Patterns, Inc. y se almacenan en el taller de moldes y sala de mantenimiento. A continuación, una arena de fórmula especial es moldeada alrededor del molde de madera. Puede haber dos o más moldes de arena para cada molde. La mezcla de arena y la elaboración de los moldes se hacen en la sala de moldeado. Cuando se retira el molde de madera, los moldes de arena resultantes forman una imagen en negativo de la pieza de fundición deseada. Entonces se transportan los moldes a la sala de fundición, donde se vierte el hierro fundido en ellos y se deja enfriar. Cuando el hierro está solidificado, los moldes pasan a la sala de limpieza, pulido y preparación, donde se colocan en grandes vibradores que sacuden gran parte de la arena de la pieza fundida. Las piezas fundidas más bastas se someten a continuación tanto a una limpieza para retirar el resto de arena como al pulido para acabar algunas de sus superficies. Las piezas se pintan entonces con una pintura especial resistente al calor, y se ensamblan formando estufas ya acabadas que son inspeccionadas para eliminar los defectos de fabricación que puedan haber pasado inadvertidos. Finalmente, las estufas son trasladadas al área de almacenamiento y envío, donde son embaladas y transportadas a las localizaciones correspondientes.

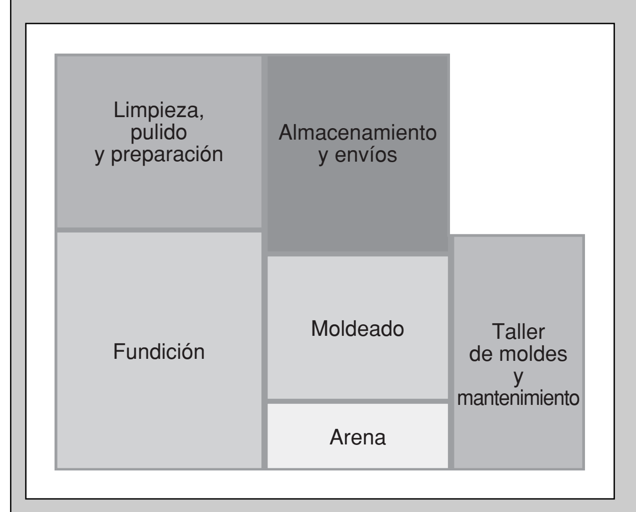


FIGURA D.6 ■ Diagrama de la fábrica

Actualmente, el taller de moldes y el departamento de mantenimiento están en la misma sala. Un único gran mostrador es utilizado tanto por el personal de mantenimiento, que almacena herramientas y piezas (que son utilizadas principalmente por el departamento de fundición), como por los moldeadores de arena, que necesitan diversos moldes para la operación de moldeado. Pete Nawler y Bob Dillman, que trabajan detrás del mostrador, pueden atender a un total de 10 personas por hora (unas 5 por hora cada uno). Como promedio, 4 personas de fundición y 3 de moldeado llegan al mostrador cada hora. Las personas de los departamentos de moldeado y fundición llegan aleatoriamente y forman una cola única para ser atendidos.

Pete y Bob siempre han seguido una política FIFO. Por la ubicación del taller de moldes y departamento de mantenimiento, una persona del departamento de fundición necesita unos 3 minutos para ir hasta la sala de moldes y mantenimiento, y lleva como 1 minuto ir del departamento de moldeado a la sala de moldes y mantenimiento.

Tras observar el funcionamiento de la sala del taller de moldes y mantenimiento durante varias semanas, George decidió hacer algunos cambios en el layout de la fábrica. En la Figura D.7 se muestra un diagrama de estos cambios.

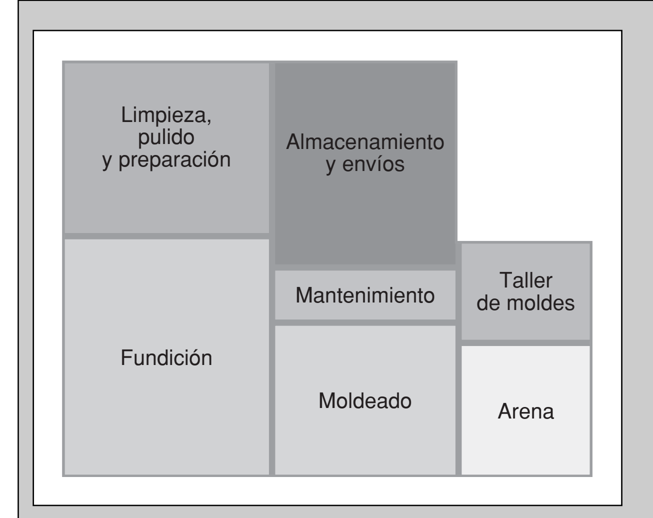


FIGURA D.6 ■ Diagrama de la fábrica tras algunos cambios

Separar el taller de mantenimiento del taller de moldes tenía una serie de ventajas. El personal de fundición necesitaría sólo 1 minuto en lugar de 3 para ir a la nueva sala de mantenimiento. El tiempo desde el área de moldeado al taller de moldes permanecería igual. Utilizando estudios de movimientos y tiempos, George también pudo determinar que la mejora del layout de la sala de mantenimiento le permitiría a Bob atender a 6 personas del departamento de fundición por hora; y que la mejora del layout del departamento de moldes permitiría a Pete atender a 7 personas del taller de moldes por hora.

Preguntas para el debate

1. ¿Cuánto tiempo ahorraría el nuevo layout?
2. Si el personal de fundición cobrase 9,50 dólares por hora y el de moldeado 11,75, ¿cuánto podría ahorrarse por hora con el nuevo layout de la fábrica?
3. ¿Debería George haber hecho el cambio en el layout?

Fuente: Extraído de *Quantitative Analysis for Management*, 9.ª ed., por B. Render y R. Stair, Jr., pp. 602-604. Copyright © 2006. Reimpreso con autorización de Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.

■ *Caso de estudio* ■

El Hotel Winter Park

Donna Shader, directora del Hotel Winter Park, está pensando en cómo reestructurar el mostrador de recepción para alcanzar un nivel óptimo de eficiencia y de servicio a los huéspedes. Actualmente, el hotel tiene 5 empleados de recepción, cada uno con una cola de espera distinta, durante las horas punta de entrada, de tres de la tarde a cinco de la tarde. La observación de las llegadas durante este periodo muestra que cada hora llega una media de 90 huéspedes (aunque no hay un límite superior en el número que podría llegar en cualquier momento). Al empleado de recepción le lleva una media de 3 minutos registrar a cada huésped.

La señora Shader está considerando tres planes para mejorar el servicio al cliente mediante la reducción del tiempo que los huéspedes pasan esperando en la cola. La primera propuesta designaría a un empleado como recepcionista de servicio rápido para la atención de huéspedes que se registrasen bajo cuentas de empresa, un segmento del mercado que cubre el 30 por ciento de todas las habitaciones ocupadas. Dado que los clientes de empresa están registrados previamente, su trámite de entrada sólo lleva 2 minutos. Con estos huéspedes separados del resto de la clientela, el tiempo medio para registrar a un huésped corriente se elevaría a 3,4 minutos. Con este plan, los clientes no corporativos elegirían cualquiera de las 4 colas restantes.

El segundo plan es implementar un sistema de cola única. Todos los huéspedes podrían formar una sola línea de espera para ser atendidos por cualquiera de los 5 empleados que estuviese disponible. Esta opción necesitaría suficiente espacio en el vestíbulo para lo que podría ser una cola considerable.

La utilización de una máquina de autorregistro de entradas es la base de la tercera propuesta. Esta máquina automática proporcionaría más o menos el mismo

ritmo de servicio que un empleado. Dado que el uso inicial de esta tecnología podría ser mínimo, Shader estima que el 20 por ciento de los clientes, principalmente huéspedes frecuentes, estaría dispuesto a utilizar estas máquinas. (Esto podría ser una estimación conservadora si los huéspedes ven ventajas directas en el uso de las autorregistradoras, como los clientes de los bancos han hecho. Citibank informa de que un 95 por ciento de sus clientes de Manhattan utiliza sus cajeros). La señora Shader formaría una cola única para los clientes que prefirieran empleados humanos para su registro de entrada. Esta cola estaría atendida por los 5 empleados, aunque Shader espera que la máquina permita una reducción a 4.

Preguntas para el debate

1. Calcule el tiempo medio de espera que pasa un huésped en recepción. ¿En qué cambiaría esto bajo cada una de las opciones expuestas?
2. ¿Qué opción recomienda?

Fuente: Extraído de *Quantitative Analysis for Management*, 9.ª ed., por B. Render y R. Stair, Jr., p. 604. Copyright © 2006. Reimpreso con autorización de Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.

■ CASO DE ESTUDIO ADICIONAL ■

Visite nuestra página personal www.prenhall.com/heizer para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Patry Shopper:** El caso requiere el rediseño de un sistema de cajeros para un supermercado.



BIBLIOGRAFÍA

Barron, K. "Hurry Up and Wait". *Forbes* (16 de octubre, 2000): pp. 158-164.

Bennett, J. C., y D. J. Worthington. "An Example of Good but Partially Successful OR Engagement: Improving Outpatient Clinic Operations". *Interfaces* 28, n.º 5 (septiembre-octubre 1998): pp. 56-69.

Dasgupta, Ani, y Ghosh, Madhubani. "Including Performance in a Queue via Prices: The Case of a Riverine Port". *Management Science* 46, n.º 11 (noviembre 2000): pp. 1466-1484.

Haksever, C., B. Render, y R. Russell. *Service Management and Operations*, 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2000).

Mandelbaum, A., y M. I. Reiman. "On Pooling Queuing Networks". *Management Science* 44, n.º 7 (julio 1998): pp. 971-981.

Prabhu, N. U. *Foundations of Queuing Theory*. Dordecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers (1997).

Render, B., R. M. Stair, y R. Balakrishnan. *Managerial Decision Modeling with Spreadsheets*, 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Render, B., R. M. Stair, y M. Hanna. *Quantitative Analysis for Management*, 9.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Samuelson, Douglas A. "Predictive Dialing for Outbound Telephone Call Centers". *Interfaces* 29, n.º 5 (septiembre 1999): pp. 66-81.

Whitt, W. "Predicting Queuing Delays". *Management Science* 45, n.º 6 (junio 1999): pp. 870-888.



RECURSOS EN INTERNET

Journal: Methodology and Computing in Applied Probability:
http://www.maths.uq.edu.au/~pkp/misc/mcap.html

Notes on Queuing Theory:
http://mscmga.ms.ic.ac.uk/jeb/or/queue.html

MÓDULO CUANTITATIVO E

CURVAS DE APRENDIZAJE

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando acabe este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

Qué es una curva de aprendizaje

Ejemplo de curvas de aprendizaje

El concepto de duplicación

Describir o explicar:

Cómo calcular los efectos de las curvas de aprendizaje

Por qué son importantes las curvas de aprendizaje

Implicaciones estratégicas de las curvas de aprendizaje

CONTENIDO DEL MÓDULO

Curvas de aprendizaje Premisa que afirma que las personas y organizaciones realizan mejor sus tareas a medida que las repiten; a veces se las llama curvas de experiencia.

La mayoría de las organizaciones aprenden y mejoran con el tiempo. A medida que empresas y empleados repiten una tarea una vez tras otra, aprenden cómo hacerla más eficientemente. Esto significa que los tiempos para hacer las tareas y los costes disminuyen.

Las **curvas de aprendizaje** parten de la premisa de que las personas y las organizaciones mejoran en la realización de sus tareas a medida que las repiten. El gráfico de una curva de aprendizaje (ilustrado en la Figura E.1) muestra las horas de mano de obra por unidad frete al número de unidades producidas. En él, vemos que el tiempo necesario para producir una unidad disminuye, normalmente siguiendo una curva exponencial negativa, a medida que la persona o empresa produce más unidades. En otras palabras, *hace falta menos tiempo para realizar cada unidad adicional producida por la empresa*. Sin embargo, vemos también en la Figura E.1 que los *ahorros* de tiempo para completar cada unidad siguiente *disminuyen*. Éstas son las características principales de una curva de aprendizaje.

Las curvas de aprendizaje se aplicaron por primera vez a la industria en un informe de T. P. Wright, de Curtis-Wright Corp., en 1936[1]. Wright describió cómo disminuían los costes de mano de obra directa en la fabricación de un avión determinado con el aprendizaje, una teoría confirmada desde entonces por otros constructores aeronáuticos. Independientemente del tiempo necesario para producir el primer avión, se encontraron curvas de aprendizaje para ser aplicadas a diferentes categorías de aviones (por ejemplo, cazas a reacción *versus* aviones de pasajeros *versus* bombarderos). Las curvas de aprendizaje se han aplicado desde entonces, no sólo a la mano de obra, sino también a una amplia variedad de otros costes, incluyendo material y componentes comprados. La fuerza de la curva de aprendizaje es tan significativa que desempeña un importante papel en muchas decisiones estratégicas relacionadas con los niveles de empleo, costes, capacidad y precios.

Los procedimientos médicos, como la cirugía cardiaca, siguen una curva de aprendizaje. La investigación indica que la tasa de mortalidad por trasplantes de corazón baja a partir de una curva de aprendizaje del 79 por ciento, una tasa de aprendizaje no muy distinta de la que encontraríamos en muchos entornos industriales. Parece que los médicos y sus equipos mejoran con la experiencia, lo que conlleva mayores posibilidades para el paciente. Si por cada tres operaciones la tasa de mortalidad se reduce a la mitad, queda claro que la práctica lleva a la perfección.

La curva de aprendizaje está basada en una *duplicación* de la producción. Esto es, cuando la producción se duplica, la disminución del tiempo por unidad afecta a la tasa de la curva de aprendizaje. Así pues, si la curva de aprendizaje tiene una tasa del 80 por ciento, la segunda unidad necesita un 80 por ciento del tiempo de la primera unidad, la cuarta

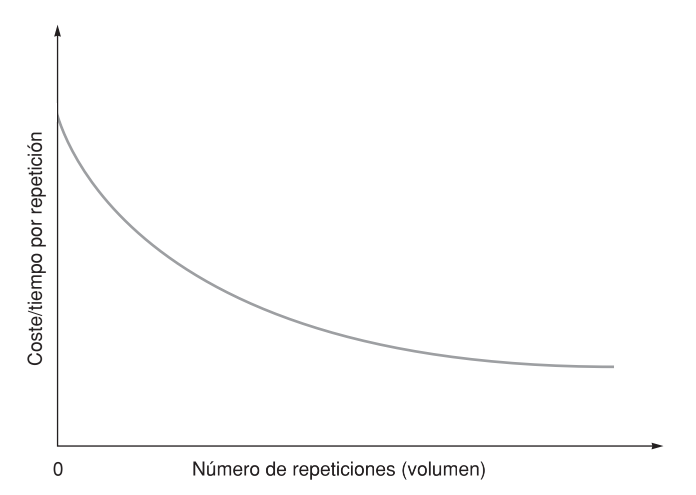


FIGURA E.1 ■ El efecto de la curva de aprendizaje afirma que el tiempo por repetición disminuye a medida que aumenta el número de repeticiones

[1] T. P. Wright, "Factors Affecting the Cost of Airplanes", *Journal of the Aeronautical Sciences* (febrero 1936).

unidad necesita un 80 por ciento del tiempo de la segunda unidad, la octava unidad necesita un 80 por ciento del tiempo de la cuarta unidad, y así sucesivamente. Este principio se muestra como:

$$T \times L^n = \text{Tiempo necesario para la } en\acute{e}sima \text{ unidad} \qquad \textbf{(E.1)}$$

donde T = coste o tiempo de la primera unidad
L = tasa de la curva de aprendizaje
n = número de veces que se duplica T

Si la primera unidad de un producto en particular necesitó 10 horas de mano de obra, y si se da una curva de aprendizaje del 70 por ciento, las horas que se necesitarán para la cuarta unidad requiere una doble duplicación en la fórmula: de 1 a 2 a 4. Por tanto, la fórmula es

$$\text{Horas necesarias para la unidad 4} = 10 \times (0{,}7)^2 = 4{,}9 \text{ horas}$$

CURVAS DE APRENDIZAJE EN SERVICIOS Y MANUFACTURA

Diferentes organizaciones (es más, diferentes productos) tiene diferentes curvas de aprendizaje. La tasa de aprendizaje varía según la calidad de la dirección y el potencial del proceso y del producto. *Cualquier cambio en el proceso, producto o personal afecta a la curva de aprendizaje*. Por lo tanto, se debe tener cuidado al suponer que una curva de aprendizaje es continua y permanente.

Como puede verse en la Tabla E.1, las curvas de aprendizaje en la industria varían ampliamente. Cuanto más bajo sea el número (pongamos 70 por ciento frente a 90 por

Intente comprobar el efecto de la curva de aprendizaje en alguna actividad que pueda estar realizando. Por ejemplo, si necesita montar cuatro estanterías, cronometre su trabajo en cada una y anote la tasa de mejora.

TABLA E.1 ■ Ejemplos de efectos de la curva de aprendizaje

Ejemplo	Parámetro de mejora	Parámetro acumulativo	Pendiente de la curva de aprendizaje (%)
1. Producción del modelo T de Ford	Precio	Unidades producidas	86
2. Montaje de aviones	Horas de mano de obra directa por unidad	Unidades producidas	80
3. Equipos de Mantenimiento en GE	Tiempo medio para sustituir un grupo de componentes	Número de sustituciones	76
4. Producción de acero	Horas de trabajo de un empleado de producción por unidad producida	Unidades producidas	79
5. Circuitos integrados	Precio medio por unidad	Unidades producidas	72[a]
6. Calculadora de mano	Precio medio de venta de fábrica	Unidades producidas	74
7. Discos de memoria	Precio medio por bit	Número de bits	76
8. Trasplantes de corazón	Tasas de mortalidad a 1 año	Trasplantes efectuados	79

[a] Dólares constantes.

Fuentes: James A. Cunningham, "Using the Learning Curve as a Management Tool", *IEEE Spectrum* (junio de 1980): 45. © 1980 IEEE; y David B. Smith y Jan L. Larsson, "The Impact of Learning on Cost: The Case of Heart Transplantation", *Hospital and Health Services Administration* (primavera de 1989): 85-97.

ciento), mayor será la pendiente y más rápida será la caída en los costes. Tradicionalmente, las curvas de aprendizaje se definen en función de los *complementos* de sus tasas de mejora. Por ejemplo, una curva de aprendizaje del 70 por ciento implica una disminución del 30 por ciento en el tiempo de producción cada vez que se duplica el número de repeticiones. Una curva del 90 por ciento significa que hay una correspondiente tasa de mejora del 10 por ciento.

Los productos y procesos estables y estandarizados tienden a tener costes que disminuyen más rápidamente que otros. Entre 1920 y 1955, por ejemplo, la industria siderúrgica pudo reducir las horas de mano de obra por unidad al 79 por ciento cada vez que se duplicaba la producción acumulada.

Las curvas de aprendizaje se aplican tanto en los servicios como en la industria. Como se apuntaba en el en el comentario (sombreado) de la pág. 438 de introducción del módulo, las tasas de mortalidad a 1 año en los pacientes con trasplante de corazón en el Hospital de la Universidad de Temple siguen una curva de aprendizaje del 79 por ciento. Los resultados de un estudio de tres años en ese hospital sobre 62 pacientes que recibieron trasplantes demostraban que cada tres operaciones daban como resultado la reducción a la mitad de la tasa de mortalidad a un año. Dado que cada vez hay más hospitales que sufren presiones, tanto de las compañías de seguros como del gobierno, para negociar precios fijos por sus servicios, su capacidad de aprender de la experiencia se hace cada vez más crítica. Aparte de tener aplicaciones tanto en los servicios como en la industria, las curvas de aprendizaje son útiles para diversos propósitos:

Si no se tienen en cuenta los efectos del aprendizaje se pueden sobreestimar las necesidades de mano de obra y subestimar las necesidades de materiales.

1. *Internos:* Previsiones de mano de obra, planificación, establecimiento de costes y presupuestos.
2. *Externos:* Negociaciones en la cadena de suministros (*véase* el caso sobre SMT al final de este módulo).
3. *Estratégicos:* Evaluación del rendimiento de una empresa y una industria, incluyendo costes y precios.

APLICACIÓN DE LA CURVA DE APRENDIZAJE

Una relación matemática nos permite expresar el tiempo requerido para producir una determinada unidad. Esta relación es función de cuántas unidades se han producido antes de la unidad en cuestión y cuánto tiempo se necesitó para producirlas. Aunque este procedimiento permite determinar cuánto tiempo hace falta para producir una determinada unidad, las consecuencias de este análisis tienen un alcance mayor. Los costes disminuyen y la eficiencia aumenta para las empresas individuales y para la industria. Por lo tanto, aparecen graves problemas de programación si no se ajustan las operaciones a las implicaciones que tiene la curva de aprendizaje. Por ejemplo, si no se tiene en cuenta la mejora de la curva de aprendizaje a la hora de realizar la programación, el resultado puede ser que la mano de obra y las instalaciones productivas estén inactivas durante parte del tiempo. Además, las empresas podrían rechazar trabajo adicional porque no tienen en cuenta la mejora de su propia eficiencia derivada del aprendizaje. Desde una perspectiva de la cadena de suministro, nuestro interés estriba en negociar cuáles deben ser los costes de nuestros proveedores para más producción de unidades, en función del tamaño de un pedido. Lo anterior son sólo algunas de las repercusiones del efecto de las curvas de aprendizaje.

Las revistas sectoriales publican datos globales de la industria sobre tasas de aprendizaje concretas en distintos tipos de operaciones.

Teniendo esto en cuenta, consideremos ahora tres enfoques de las curvas de aprendizaje: el enfoque aritmético, el enfoque logarítmico y los coeficientes de la curva de aprendizaje.

Enfoque aritmético

El enfoque aritmético es el enfoque más simple para los problemas de curvas de aprendizaje. Como apuntábamos al principio de este módulo, cada vez que se duplica la producción, disminuye la mano de obra por unidad en un factor constante, conocido como la tasa de aprendizaje. Así pues, si sabemos que la tasa de aprendizaje es del 80 por ciento y que la primera unidad producida necesitó 100 horas, las horas requeridas para producir la segunda, cuarta, octava y decimosexta unidades son las siguientes:

Unidad producida	Horas para la unidad *N*
1	100,0
2	80,0 = (0,8 × 100)
4	64,0 = (0,8 × 80)
8	51,2 = (0,8 × 64)
16	41,0 = (0,8 × 51,2)

Este método funciona si queremos saber las horas necesarias para producir *N* unidades, y *N* es uno de los valores duplicados. El enfoque aritmético no nos dice cuántas horas serán necesarias para producir otro número de unidades. Para tener esta flexibilidad, debemos recurrir al método logarítmico.

Enfoque logarítmico

El enfoque logarítmico nos permite determinar la mano de obra para *cualquier* unidad T_N, mediante la fórmula

$$T_N = T_1 (N^b) \qquad \textbf{(E.2)}$$

donde T_N = tiempo para producir la unidad N
T_1 = horas para producir la primera unidad
b = (log de la tasa de aprendizaje)/(log 2) = pendiente de la curva de aprendizaje

En la Tabla E.2 se presentan algunos valores de *b*. El Ejemplo E1 muestra cómo se utiliza esta fórmula.

TABLA E.2 ■ Valores de *b* para la curva de aprendizaje

Tasa de aprendizaje (%)	*b*
70	−0,515
75	−0,415
80	−0,322
85	−0,234
90	−0,152

EJEMPLO E1

Utilización de los logaritmos para calcular las curvas de aprendizaje

La tasa de aprendizaje para una operación concreta es del 80 por ciento, y la primera unidad de producción requirió 100 horas. Las horas necesarias para producir la tercera unidad pueden calcularse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} T_N &= T_1(N^b) \\ T_3 &= (100 \text{ horas})(3^b) \\ &= (100)(3^{\log 0,8/\log 2}) \\ &= (100)(3^{-0,322}) = 70,2 \text{ horas de mano de obra} \end{aligned}$$



Archivo de datos de Excel OM ModEExE1.xla

El método logarítmico nos permite calcular las horas necesarias para cualquier unidad producida, pero de hecho *existe* un método aún más sencillo.

Enfoque del coeficiente de la curva de aprendizaje

La técnica del coeficiente de la curva de aprendizaje está expresada en la Tabla E.3 y en la siguiente ecuación:

$$T_N = T_1 C \qquad \textbf{(E.3)}$$

donde T_N = número de horas laborables para producir la e*N*ésima unidad
T_1 = número de horas laborables para producir la primera unidad
C = coeficiente de la curva de aprendizaje que se muestra en la Tabla E.3

El coeficiente de la curva de aprendizaje, *C*, depende tanto de la tasa de aprendizaje (70 por ciento, 75 por ciento, 80 por ciento, etcétera) como de la unidad que nos interesa.

TABLA E.3 ■ Coeficientes de la curva de aprendizaje, donde el coeficiente, $C = N^{(\text{log de la tasa de aprendizaje/log 2})}$

	70%		75%		80%		85%		90%	
Número de unidad (*N*) Tiempo	Tiempo por unidad	Tiempo total	Tiempo por unidad	Tiempo total	Tiempo por unidad	Tiempo total	Tiempo por unidad	Tiempo total	Tiempo por unidad	Tiempo total
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,700	1,700	0,750	1,750	0,800	1,800	0,850	1,850	0,900	1,900
3	0,568	2,268	0,634	2,384	0,702	2,502	0,773	2,623	0,846	2,746
4	0,490	2,758	0,562	2,946	0,640	3,142	0,723	3,345	0,810	3,556
5	0,437	3,195	0,513	3,459	0,596	3,738	0,686	4,031	0,783	4,339
6	0,398	3,593	0,475	3,934	0,562	4,299	0,657	4,688	0,762	5,101
7	0,367	3,960	0,446	4,380	0,534	4,834	0,634	5,322	0,744	5,845
8	0,343	4,303	0,422	4,802	0,512	5,346	0,614	5,936	0,729	6,574
9	0,323	4,626	0,402	5,204	0,493	5,839	0,597	6,533	0,716	7,290
10	0,306	4,932	0,385	5,589	0,477	6,315	0,583	7,116	0,705	7,994
11	0,291	5,223	0,370	5,958	0,462	6,777	0,570	7,686	0,695	8,689
12	0,278	5,501	0,357	6,315	0,449	7,227	0,558	8,244	0,685	9,374
13	0,267	5,769	0,345	6,660	0,438	7,665	0,548	8,792	0,677	10,052
14	0,257	6,026	0,334	6,994	0,428	8,092	0,539	9,331	0,670	10,721
15	0,248	6,274	0,325	7,319	0,418	8,511	0,530	9,861	0,663	11,384
16	0,240	6,514	0,316	7,635	0,410	8,920	0,522	10,383	0,656	12,040
17	0,233	6,747	0,309	7,944	0,402	9,322	0,515	10,898	0,650	12,690
18	0,226	6,973	0,301	8,245	0,394	9,716	0,508	11,405	0,644	13,334
19	0,220	7,192	0,295	8,540	0,388	10,104	0,501	11,907	0,639	13,974
20	0,214	7,407	0,288	8,828	0,381	10,485	0,495	12,402	0,634	14,608
25	0,191	8,404	0,263	10,191	0,355	12,309	0,470	14,801	0,613	17,713
30	0,174	9,305	0,244	11,446	0,335	14,020	0,450	17,091	0,596	20,727
35	0,160	10,133	0,229	12,618	0,318	15,643	0,434	19,294	0,583	23,666
40	0,150	10,902	0,216	13,723	0,305	17,193	0,421	21,425	0,571	26,543
45	0,141	11,625	0,206	14,773	0,294	18,684	0,410	23,500	0,561	29,366
50	0,134	12,307	0,197	15,776	0,284	20,122	0,400	25,513	0,552	32,142

El Ejemplo E2 utiliza la ecuación anterior y la Tabla E.3 para calcular los efectos de la curva de aprendizaje.

EJEMPLO E2

Utilización de los coeficientes de la curva de aprendizaje

Unos astilleros coreanos necesitaron 125.000 horas de mano de obra para producir el primero de una serie de remolcadores que usted desea comprar para su compañía naviera, Great Lakes, Inc. Los barcos 2 y 3 han sido producidos por los coreanos con un factor de aprendizaje del 85 por ciento. A 40 dólares por hora, como comprador que es usted, ¿qué debería esperar pagar por la cuarta unidad?

Primero, busque la cuarta unidad en la Tabla E.3 y un factor de aprendizaje del 85 por ciento. El coeficiente de la curva de aprendizaje, C, es de 0,723. Para producir la cuarta unidad, por tanto, se necesitan

$$T_N = T_1C$$
$$T_4 = (125.000 \text{ horas})(0{,}723)$$
$$= 90.375 \text{ horas}$$

Para hallar el coste, multiplique por 40 dólares:

$$90.375 \text{ horas} \times 40\$ \text{ por hora} = 3.615.000 \text{ dólares}$$





Los Ejemplos E2 y E3 se ilustran con más detalle en el ejercicio Active Model E1 del CD-ROM y en un ejercicio al final del capítulo.

La Tabla E.3 también muestra *valores acumulativos*. Éstos nos permiten calcular el número total de horas necesarias para producir un determinado número de unidades. De nuevo, el cálculo es sencillo. Basta con multiplicar el valor de la tabla por el tiempo necesario para la primera unidad. El Ejemplo E3 ilustra este concepto.

EJEMPLO E3

Utilización de los coeficientes acumulados

El Ejemplo E2 calculaba el tiempo para producir el cuarto remolcador que Great Lakes tiene pensado comprar. ¿Cuánto tiempo necesitarán *los cuatro* barcos juntos?

Mirando esta vez en la columna "tiempo total" de la Tabla E.3, observamos que el coeficiente acumulado es 3,345. En consecuencia, el tiempo requerido es

$$T_N = T_1C$$
$$T_4 = (125.000)(3{,}345) = 418.125 \text{ horas en total para los 4 barcos}$$

Para una demostración de cómo se puede utilizar el programa Excel OM para resolver los Ejemplos E2 y E3, *véase* el Programa E.1 al final de este módulo.

El uso de la Tabla E.3 exige saber cuánto tiempo requiere completar la primera unidad. Sin embargo, ¿qué ocurre si nuestra información disponible más reciente o más fiable pertenece a alguna otra unidad? La respuesta es que debemos utilizar esos datos para hallar una estimación revisada para la primera unidad y luego aplicar la tabla a ese número. El Ejemplo E4 muestra este concepto.

EJEMPLO E4

Revisión de las estimaciones de la curva de aprendizaje

Great Lakes, Inc., cree que circunstancias excepcionales en la producción del primer barco (*véase* el Ejemplo E2) hacen que la estimación de tiempo de 125.000 horas no sea una base tan válida como el tiempo necesario para producir el tercer barco. El barco número 3 fue terminado en 100.000 horas.

Para encontrar la estimación revisada del barco número 1, volvemos a la Tabla E.3, con un valor de $N = 3$ y un coeficiente de la curva de aprendizaje de $C = 0{,}773$ en la columna del 85 por ciento. Para hallar la estimación revisada, dividimos el tiempo real para el barco número 3, 100.000 horas, por $C = 0{,}773$

$$\frac{100.000}{0{,}773} = 129.366 \text{ horas}$$

En consecuencia, 129.366 horas es la nueva (revisada) estimación para el barco 1.

IMPLICACIONES ESTRATÉGICAS DE LAS CURVAS DE APRENDIZAJE

Hasta ahora, hemos mostrado cómo los directores de operaciones pueden prever las necesidades de horas de mano de obra para un producto. También hemos mostrado cómo los agentes de compras pueden determinar el coste de un proveedor, conocimiento que puede ayudar a la hora de negociar los precios. Otra aplicación importante de las curvas de aprendizaje se refiere a la planificación estratégica.

En la Figura E.2 se muestra un ejemplo de recta de costes de una empresa y recta de precios de una industria. Estas curvas de aprendizaje son rectas porque ambas escalas son

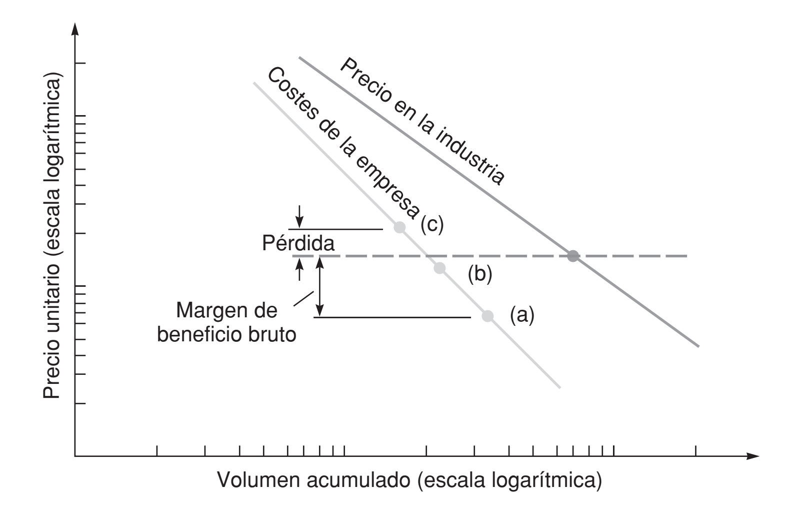


FIGURA E.2 ■ Curva de aprendizaje de la industria para el precio comparada con la curva de aprendizaje de la empresa para el coste

Nota: Los ejes horizontal y vertical de esta figura son escalas logarítmicas. Esto se conoce como gráfico logarítmico (log-log).

logarítmicas. Cuando la *tasa* de cambio es constante, un gráfico log-log da una línea recta. Si una organización cree que sus costes son como los de la recta de "costes de la empresa" y el precio en la industria es el que se indica por la línea discontinua horizontal, entonces la empresa tiene que tener los costes en puntos por debajo de la línea horizontal (por ejemplo, punto *a* o *b*) o, si no, operar en un punto con pérdidas (punto *c*).

Los costes más bajos no se alcanzan de forma automática; tienen que ser disminuidos por la acción directiva. Cuando la estrategia de una empresa es buscar una recta con más pendiente que la de la media de la industria (la recta de costes de la empresa de la Figura E.2), lo consigue:

Aplicaciones de la curva de aprendizaje

1. *Interna* → determinar los estándares de mano de obra y las cantidades de suministros de material necesarios.
2. *Externa* → determinar los costes de las compras.
3. *Estratégica* → determinar los cambios en los costes según el volumen de producción.

1. Siguiendo una política de precios agresiva.
2. Concentrándose en una continua reducción de costes y de mejora de la productividad.
3. Construyendo sobre experiencias compartidas.
4. Asegurando que la capacidad crezca por delante de la demanda.

Los costes pueden disminuir a medida que la empresa avanza a lo largo de la curva de aprendizaje, pero el volumen tiene que aumentar para que exista la curva de aprendizaje. Además, los directivos deben comprender a los competidores antes de embarcarse en una estrategia de curva de aprendizaje. Los competidores más débiles están infracapitalizados, atascados con altos costes, o no comprenden la lógica de las curvas de aprendizaje. Sin embargo, los competidores fuertes y peligrosos controlan sus costes, tienen posiciones financieras sólidas para efectuar las grandes inversiones que necesitan, y tienen un historial de utilizar una estrategia de curvas de aprendizaje agresiva. El enfrentamiento en una guerra de precios con un competidor de este tipo sólo puede beneficiar al consumidor.

LIMITACIONES DE LAS CURVAS DE APRENDIZAJE

Antes de utilizar las curvas de aprendizaje, se deben tomar ciertas precauciones:

- Dado que las curvas de aprendizaje varían de empresa a empresa, así como de industria a industria, es necesario desarrollar estimaciones para cada organización en vez de aplicar las de otras.
- Las curvas de aprendizaje se basan a menudo en el tiempo necesario para terminar las primeras unidades; por tanto, esos tiempos deben ser exactos. A medida que se actualiza la información disponible, puede resultar adecuado volver a estimar los tiempos.
- Cualquier cambio en el personal, diseño o procedimientos es susceptible de alterar la curva de aprendizaje. Y la curva puede subir de golpe durante el corto plazo, aun cuando vaya a bajar a largo plazo.
- Aunque los trabajadores y el proceso puedan mejorar, las mismas curvas de aprendizaje no siempre se aplican a la mano de obra indirecta y al material.
- La cultura del lugar de trabajo, así como la disponibilidad de recursos y los cambios en el proceso, pueden alterar la curva de aprendizaje. Por ejemplo, cuando un proyecto está llegando a su fin, el interés y el esfuerzo del trabajador pueden disminuir, de modo que reducen la disminución de la curva.

RESUMEN

La curva de aprendizaje es una poderosa herramienta para el director de operaciones. Esta herramienta puede ayudar a los directores de operaciones a determinar los futuros costes estándar de los artículos producidos y también de los comprados. Además, la curva de aprendizaje puede suministrar conocimiento sobre el rendimiento de la empresa y de la industria. Hemos visto tres enfoques de las curvas de aprendizaje: análisis aritmético, análisis logarítmico y coeficientes de la curva de aprendizaje, mostrados en tablas. El software también puede ayudar a analizar las curvas de aprendizaje.

TÉRMINOS CLAVE

Curvas de aprendizaje *(p. 438)*

CÓMO UTILIZAR EL SOFTWARE PARA LAS CURVAS DE APRENDIZAJE

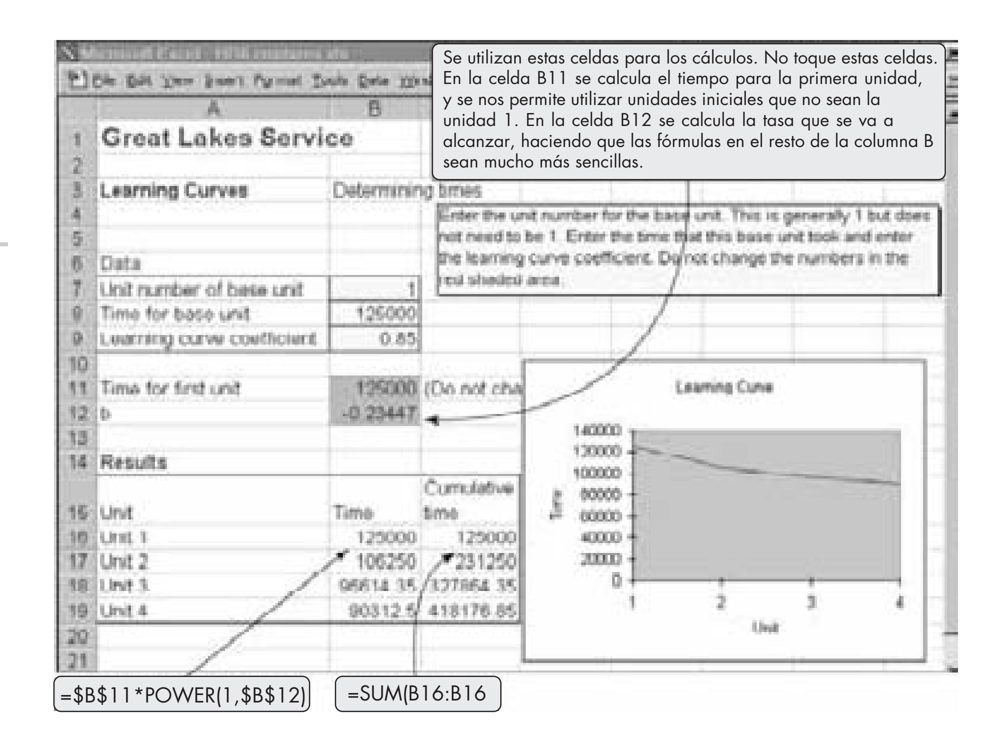
Excel, Excel OM y POM para Windows sirven para analizar las curvas de aprendizaje. Puede utilizar las ideas de la siguiente sección sobre Excel OM para construir, sí así lo desea, su propia hoja de cálculo Excel.



Cómo utilizar Excel OM

El Programa E.1 muestra cómo desarrolla Excel OM una hoja de cálculo para los cálculos de la curva de aprendizaje. Los datos de entrada proceden de los Ejemplos E2 y E3. En la celda B7 introducimos el número de la unidad que sirve de unidad base (que no debe ser 1 necesariamente), y en B8 introducimos el tiempo para esta unidad.

PROGRAMA E.1 ■ Módulo de curva de aprendizaje de Excel OM con los datos de los Ejemplos E2 y E3





Cómo utilizar POM para Windows para las curvas de aprendizaje

El módulo de curva de aprendizaje de POM para Windows calcula el tiempo necesario para realizar las unidades futuras, dados el tiempo necesario para la unidad base y la tasa de aprendizaje (expresada con un número entre 0 y 1). Opcionalmente, si los tiempos necesarios para la primera y la enésima unidad ya son conocidos, se puede calcular la *tasa* de aprendizaje. *Véase* el Apéndice IV para más detalles.



PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto E.1

Digicomp produce un nuevo sistema telefónico con pantallas de televisión integradas. Su tasa de aprendizaje es del 80 por ciento.

a) Si hicieron falta 56 horas para fabricar el primer sistema, ¿cuánto tiempo le llevará a Digicomp fabricar el undécimo sistema?

b) ¿Cuánto tiempo hará falta para fabricar los 11 primeros sistemas en total?

c) Como agente de compras, tiene previsto comprar las unidades 12 a 15 del nuevo sistema telefónico. ¿Qué coste esperaría tener que pagar para las unidades si Digicomp cobra 30 dólares por cada hora de mano de obra?

Solución

a) $T_N = T_1 C$ ← de la Tabla E.3: 80 por ciento tiempo por unidad

T_{11} = (56 horas) (0,462) = 25,9 horas

b) Tiempo total para las 11 primeras unidades = (56 horas)(6,777) = 379,5 horas

de la Tabla E.3: 80 por ciento tiempo total (6,777)

c) Para hallar el tiempo de las unidades 12 a 15, tomamos el tiempo acumulado total para las unidades 1 a 15 y restamos el tiempo total de las unidades 1 a 11, que fue calculado en b). El tiempo total para las 15 primeras unidades = (56 horas)(8,511) = 476,6 horas. Así, el tiempo para las unidades 12 a 15 es 476,6 − 379,5 = 97,1 horas (esta cifra también puede confirmarse calculando los tiempos de las unidades 12, 13, 14 y 15 por separado utilizando la columna del tiempo por unidad y luego sumándolos). Coste esperado para las unidades 12 a 15 = (97,1 horas) (30 dólares por hora) = 2.913 dólares.

Problema Resuelto E.2

Si la primera vez que realiza un trabajo le lleva 60 minutos, ¿cuánto tiempo le llevará el octavo trabajo si está en una curva de aprendizaje del 80 por ciento?

Solución

Tres duplicaciones de 1 a 2 a 4 a 8 implican $0,8^3$. Por tanto, tenemos

$$60 \times (0,8)^3 = 60 \times 0,512 = 30,72 \text{ minutos}$$

o bien, utilizando la Tabla E3, tenemos C = 0,512. Por tanto:

$$60 \times 0,512 = 30,72 \text{ minutos}$$

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.

 En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Problemas en Internet
- Caso de estudio en Internet

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- Ejercicios Active Model
- Excel OM
- Archivo de datos para el ejemplo de Excel OM
- POM para Windows



CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. ¿Cuáles son algunas de las limitaciones para utilizar las curvas de aprendizaje?
2. Identifique tres aplicaciones de las curvas de aprendizaje.
3. ¿Cuáles son los enfoques para resolver problemas de curva de aprendizaje?
4. Remítase al Ejemplo E2. ¿Cuáles son las repercusiones para Great Lakes, Inc., si el departamento de ingeniería quiere cambiar el motor en el tercero y siguientes remolcadores, que va a comprar la empresa?
5. ¿Por qué el concepto de curva de aprendizaje no es tan aplicable en una línea de montaje de alto volumen como lo es en la mayoría de las demás actividades humanas?
6. ¿Cuáles son los elementos que pueden afectar a la curva de aprendizaje?
7. Explique el concepto del efecto "duplicador" en las curvas de aprendizaje.
8. ¿Qué técnicas puede utilizar una empresa para pasar a una curva de aprendizaje más inclinada?

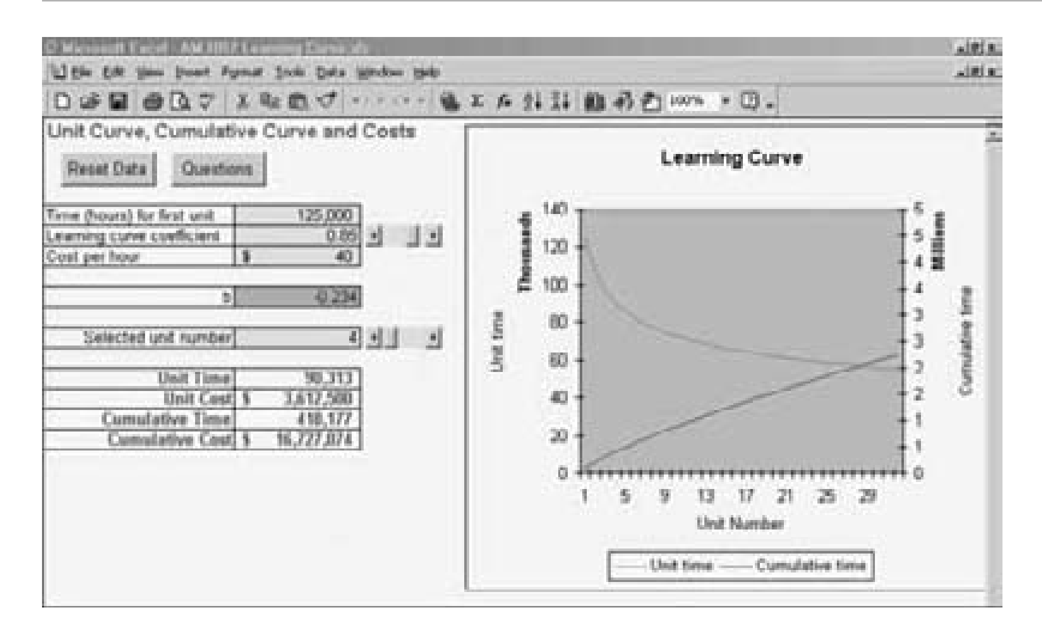


EJERCICIO ACTIVE MODEL

Este ejercicio Active Model, que puede encontrar en su CD-ROM, le permite evaluar importantes elementos del modelo de curva de aprendizaje descrito en los Ejemplos E2 y E3. Puede cambiar cualquier de los parámetros de las celdas de color verde.

Preguntas

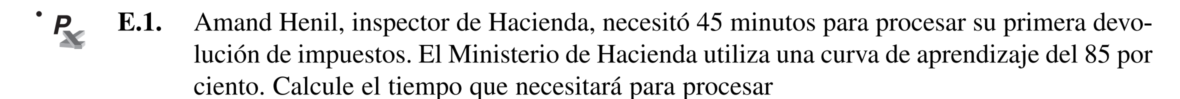
1. Si el aprendizaje no es tan bueno como se esperaba y aumenta hasta el 90 por ciento, ¿cuánto costará el cuarto barco?
2. ¿Cuál tendría que ser el coeficiente de aprendizaje para que el coste total de los cuatro primeros barcos se mantenga por debajo de 16 millones de dólares?
3. ¿Cuántos barcos hay que producir antes de que el coste de un barco individual esté por debajo de 4 millones?
4. ¿Cuántos barcos hay que producir antes de que el coste *medio* de cada barco esté por debajo de 4 millones?



ACTIVE MODEL E.2 ■ Análisis de la curva de aprendizaje de construcción de barcos de Great Lakes, Inc., utilizando los datos de los Ejemplos E2 y E3.



PROBLEMAS*



• **E.1.** Amand Henil, inspector de Hacienda, necesitó 45 minutos para procesar su primera devolución de impuestos. El Ministerio de Hacienda utiliza una curva de aprendizaje del 85 por ciento. Calcule el tiempo que necesitará para procesar

a) la segunda devolución
b) la cuarta devolución
c) la octava devolución.

• **E.2.** Seton Hall Trucking Co. acaba de contratar a Rally Kissel para verificar las facturas diarias y las cuentas pendientes. Necesitó 9 horas y 23 minutos para terminar su trabajo el primer día. Empleados anteriores en ese puesto tendieron a seguir una curva de aprendizaje de 90 por ciento. Calcule el tiempo que llevará la tarea al final del

a) segundo día
b) cuarto día
c) octavo día
d) decimosexto día.

• **E.3.** Si la profesora Tacy Quinn tarda 15 minutos en calificar el primer examen, y sigue una curva de aprendizaje del 80 por ciento, calcule el tiempo que tardará en calificar

a) el vigésimo quinto examen
b) los 10 primeros exámenes.

---

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; significa que se puede resolver el problema con Excel OM; significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

• P

E.4. Si se han necesitado 563 minutos para realizar el primer trasplante de córnea en un hospital, y el hospital utiliza una tasa de aprendizaje del 90 por ciento, calcule el tiempo que se necesitará para realizar

a) los 3 primeros trasplantes
b) los 6 primeros trasplantes
c.) los 8 primeros trasplantes
d) los 16 primeros trasplantes.

E.5. El hospital Beth Zion ha recibido la certificación inicial del estado de California para convertirse en un centro de trasplantes de hígado. El hospital, sin embargo, debe realizar sus 18 primeros trasplantes bajo una intensa supervisión y sin coste para los pacientes. El primero de todos los trasplantes, recién acabado, requirió 30 horas. A partir de los estudios del hospital, Beth Zion estima que tendrá una curva de aprendizaje del 80 por ciento. Calcule el tiempo que llevará completar

a) el quinto trasplante de hígado
b) los 5 primeros trasplantes en total
c) el decimoctavo trasplante
d) los 18 trasplantes.

E.6. Remítase al Problema E.5. El hospital Beth Zion acaba de ser informado de que sólo los 10 primeros trasplantes tienen que ser realizados a costa del hospital. Se estima el coste por hora de cirugía en 5.000 dólares. De nuevo, la tasa de aprendizaje es del 80 por ciento y la primera operación necesitó 30 horas.

a) ¿Cuánto tiempo necesitará la décima operación?
b) ¿Cuánto costará la décima operación?
c) ¿Cuánto le costarán al hospital las 10 operaciones en total?

E.7. Manceville Air acaba de producir la primera unidad de un gran compresor industrial que incorpora nueva tecnología en los circuitos de control y un nuevo sistema de ventilación interno. La primera unidad requirió 112 horas de mano de obra para fabricarla. La empresa sabe, por su experiencia anterior, que este contenido en mano de obra disminuirá significativamente a medida que se vayan produciendo más unidades. Al revisar datos anteriores de producción, se observa que la empresa ha tenido una curva de aprendizaje del 90 por ciento al fabricar sistemas parecidos. La empresa quiere estimar el tiempo total necesario para fabricar las próximas 7 unidades. Calcule la estimación.

E.8. Candice Cotton, estudiante de la Universidad Estatal de San Diego, ha comprado seis estanterías para su habitación. Hay que desembalar y montar las piezas de cada una, incluyendo algunos clavos y tornillos. Terminó la primera estantería en 5 horas y la segunda en 4 horas.

a) ¿Cuál es su tasa de aprendizaje?
b) Suponiendo que se mantenga esa tasa, ¿cuánto necesitará para la tercera estantería?
c) ¿Y para la cuarta, quinta y sexta?
d) ¿Y para las seis?

E.9. La profesora Mary Beth Marrs tardó seis horas en preparar su primera clase de un nuevo curso. Tradicionalmente ha tenido un factor de aprendizaje del 90 por ciento. ¿Cuánto tiempo debería tardar en preparar la decimoquinta clase?

E.10. La primera máquina expendedora que montó M. D'Allessandro, Inc., requirió 80 horas de mano de obra. Calcule cuánto tiempo se necesitará para montar la cuarta máquina para cada una de las siguientes tasas de aprendizaje:

a) 95 por ciento
b) 87 por ciento
c) 72 por ciento.

E.11. Kara-Smith Systems está instalando un sistema de red en Advantage Insurance. La primera instalación requirió 46 horas de mano de obra. Estime cuánto se necesitará para la cuarta y la octava instalación con cada una de las siguientes tasas de aprendizaje:

a) 92 por ciento
b) 84 por ciento
c) 77 por ciento.

E.12. El Centro Evaluador de Baltimore selecciona y forma empleados para una empresa de montaje de computadoras en Towson, Maryland. Se supervisa el progreso de todos los aprendices y los que no muestran un progreso adecuado son trasladados a programas menos exigentes. A la décima repetición, los aprendices deben ser capaces de terminar el ensamblaje en 1 hora o menos. Torri Olson-Alves acaba de emplear 5 horas en la cuarta unidad y 4 horas para terminar su séptima unidad, mientras que otro aprendiz, Julie Burgmeier, necesitó 4 horas en la sexta y 3 horas en la novena unidad. ¿Debería usted animar a alguno de los dos, o a ambos, a que continúen? ¿Por qué?

E.13. Los mejores estudiantes del Centro Evaluador de Baltimore (*véase* el Problema E.12) tienen una curva de aprendizaje del 80 por ciento y pueden realizar una tarea en 20 minutos al cabo de sólo seis veces. A usted le gustaría eliminar antes a los estudiantes menos competentes y decide evaluarlos después de la tercera unidad. ¿Cuánto tiempo se necesitaría para realizar la tercera unidad?

E.14. Collette Siever, agente de compras de Northeast Airlines, quiere determinar lo que puede tener que pagar por el avión número 4 si se tardó 20.000 horas en producir el tercer avión. ¿Qué esperaría pagar por el quinto avión? ¿Y por el sexto? Utilice una curva de aprendizaje del 85 por ciento y un coste de la mano de obra de 40 dólares por hora.

E.15. Con los datos del Problema E.14, ¿cuánto tiempo requerirá terminar el duodécimo avión? ¿Y el decimoquinto? ¿Cuánto tiempo requerirá terminar los aviones 12 a 15, ambos inclusive? A 40 dólares la hora, ¿cuánto puede usted, como agente de compras, tener que pagar por los 4 aviones en total?

E.16. La empresa Dynamic RAM Corp. produce semiconductores y tiene una curva de aprendizaje de 0,7. El precio por bit es de 700 milicentavos cuando el volumen de producción es de $0{,}7 \times 10^{12}$ bits. ¿Cuál es el precio esperado en $1{,}4 \times 10^{12}$ bits? ¿Cuál es el precio esperado en $89{,}6 \times 10^{12}$ bits?

E.17. Central Power posee 25 pequeñas centrales eléctricas. Ha contratado a Genco Services para revisar las turbinas de cada central. El número de horas que facturó Genco a Central para completar la tercera turbina fue de 460. Central paga a Genco 60 dólares por hora por sus servicios. Como director de mantenimiento de Central, está intentando estimar el coste de revisar la cuarta turbina. ¿Cuánto esperaría pagar para revisar la quinta y sexta turbina? Todas las turbinas son iguales y existe una curva de aprendizaje del 80 por ciento.

E.18. Hacen falta 28.718 horas para producir la octava locomotora en una gran compañía industrial francesa. Si el factor de aprendizaje es del 80 por ciento, ¿cuánto tiempo se necesitará para producir la décima locomotora?

E.19. La empresa de Eric Krassow está a punto de pujar por un nuevo sistema de radar. Aunque el producto utiliza nueva tecnología, Krassow cree que puede utilizar una tasa de aprendizaje del 75 por ciento. Se espera que se necesiten 700 horas para fabricar la primera unidad, y el contrato es para 40 unidades.

a) ¿Cuál es el número total de horas para fabricar las 40 unidades?
b) ¿Cuál es el tiempo medio para construir cada una de las 40 unidades?
c) Suponga que un trabajador trabaja 2.080 horas al año. ¿Cuántos trabajadores habrá que asignar a este contrato para cumplirlo en un año?

E.20. Como encargado de presupuestos en Peter Ancona Enterprises, su trabajo consiste en preparar un presupuesto para un contrato de servicio a un cliente potencial. El contrato es para el mantenimiento de las cabezas de los cilindros de las locomotoras diesel. El taller tiene cierta experiencia en estas tareas, que ha realizado esporádicamente en el pasado. El tiempo necesario para el mantenimiento de cada cilindro ha sido exactamente de 4 horas, y se han realizado trabajos análogos siguiendo una curva de aprendizaje del 85 por ciento. El cliente quiere que le dé el presupuesto en lotes de 12 y 20.

a) Prepare el presupuesto.
b) Después de preparar el presupuesto, usted encuentra un albarán de mano de obra para este cliente de cinco cabezas de cilindro de locomotora. De las diversas anotaciones en el albarán de mano de obra, saca la conclusión de que la quinta unidad requirió 2,5 horas. ¿Qué conclusión saca usted acerca de la curva de aprendizaje y de su presupuesto?

E.21. Sara Bredbenner y Blake DeYoung son compañeros de equipo en una tienda de descuento (*discount store*); su nueva tarea consiste en montar balancines para los clientes. El ensamblaje de un balancín tiene una tasa de aprendizaje del 90 por ciento. Se les olvidó cronometrar el tiempo que tardaron en montar el primer balancín, pero necesitaron 4 horas para montar el segundo. Tienen que montar seis más. Calcule aproximadamente cuánto tiempo necesitarán para

a) la siguiente unidad
b) la octava unidad
c) las ocho unidades.

E.22. Kelly-Lambing, Inc., un fabricante de pequeños buques contratados por el gobierno, tiene una plantilla fija de 10 artesanos muy cualificados. Estos trabajadores pueden trabajar hasta 2.500 horas al año cada uno. Kelly-Lambing está a punto de firmar un nuevo contrato para construir un nuevo tipo de buque. Se espera que hagan falta 6.000 horas para fabricar el primero. La empresa cree que la tasa de aprendizaje esperada será del 90 por ciento.

a) ¿Cuál es la "capacidad" de la empresa para fabricar estos barcos, es decir, cuántas unidades podrá fabricar en un año?

b) Si el director de operaciones puede aumentar la tasa de aprendizaje al 85 por ciento, en vez del 90 por ciento, ¿cuántas unidades podrá fabricar la empresa?

E.23. Fargo Production ha contratado a la empresa Johnson Services para la revisión y puesta a punto de los 25 robots de su fábrica. Todos los robots son parecidos y existe una curva de aprendizaje del 80 por ciento. El número de horas que Johnson ha facturado a Fargo por completar la revisión del tercer robot fue de 460. Fargo paga 60 dólares por hora por el servicio. Fargo quiere estimar:

a) ¿Cuántas horas harán falta para revisar el decimotercer robot?

b) ¿Y el decimoquinto?

c) ¿Cuánto tiempo total hará falta para revisar del décimo al decimoquinto robot inclusive?

d) Como persona que gestiona los costes de revisión de todos los equipos, ¿a cuánto estima que ascenderá el coste del contrato de revisión de los 25 robots?

E.24. Está analizando la posibilidad de construir un avión para formar a pilotos. Cree que hay un mercado para 50 aviones de este tipo, que tendrán una velocidad máxima de 400 nudos y un peso en vacío de 10.000 libras. Usted necesitará un avión de pruebas. Utilice el sitio web de la NASA **(www.jsc.nasa.gov/bu2/airframe.html)** para calcular el coste total y el coste de ingeniería de la construcción de los 50 aviones.

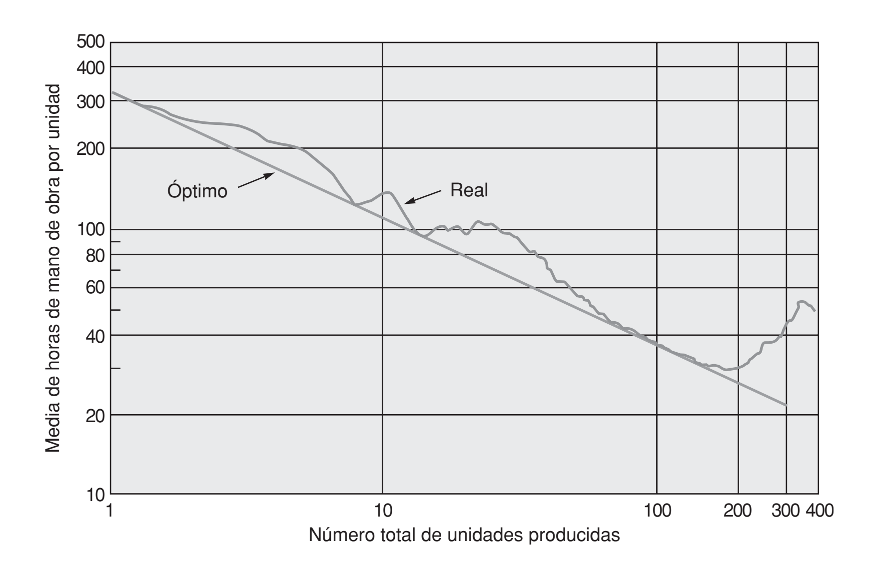
E.25. Utilizando el siguiente gráfico logarítmico, conteste a las siguientes preguntas:

a) ¿Cuáles son las implicaciones para la dirección si ha previsto sus costes sobre la recta óptima?

b) ¿Qué es lo que podría estar causando las fluctuaciones por encima de la recta óptima?

c) Si la dirección prevé la décima unidad sobre la recta óptima, ¿cuál fue la previsión en horas?

d) Si la dirección produce la décima unidad tal y como indica la curva real, ¿cuántas horas necesitó?





PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: E.26 a E.33.

Caso de estudio

Negociación de SMT con IBM

IBM pidió a SMT y a otra empresa, mucho más grande, que hicieran una oferta para 80 unidades adicionales de un producto informático determinado. En la solicitud de presupuesto se pedía que se detallase el presupuesto global para mostrar el precio por hora, las piezas y componentes materiales incluidos en el precio, así como cualquier cargo por servicios subcontratados. SMT hizo una oferta de 1,62 millones y proporcionó los detalles tal y como se solicitaron. La segunda empresa presentó sólo una cifra total, 5 millones de dólares, sin detalles sobre los costes. La decisión fue negociar con SMT.

El equipo negociador de IBM incluía a dos directivos de compras y a dos ingenieros de costes. Uno de los ingenieros de costes había desarrollado estimaciones de costes de fabricación para cada componente, trabajando a partir de planos de ingeniería y de libros con datos sobre costes que había elaborado a partir de experiencias previas y que incluían factores de tiempo, tanto de preparación como de proceso, para una amplia variedad de operaciones. Estimó los costes de materiales trabajando tanto con los datos proporcionados por el personal de compras corporativas de IBM como con datos de revistas de compras. Visitó las instalaciones de SMT para ver la maquinaria disponible y ver qué procesos se estaban utilizando. Dio por supuesto que habría unas condiciones perfectas y operarios bien formados, y desarrolló unas estimaciones de costes para la unidad número 158 (los pedidos anteriores fueron de 25, 15 y 38 unidades). Sumó un 5 por ciento por pérdidas por rechazos y otras causas, un 2 por ciento por el uso de herramientas, gálibos e instalaciones temporales, un 5 por ciento por el control de calidad, y un 9 por ciento por los gastos de compras. Luego, utilizando una curva de aprendizaje del 85 por ciento, confirmó sus costes para conseguir una estimación de la primera unidad. A continuación, comprobó los datos sobre horas y materiales para las unidades 25, 15 y 38 ya hechas y vio que su estimación para la primera unidad estaba dentro del 4 por ciento del coste real. Su comprobación, sin embargo, había indicado un efecto de curva de aprendizaje del 90 por ciento sobre las horas por unidad.

En las negociaciones, SMT estaba representada por uno de los propietarios del negocio, dos ingenieros y un estimador de costes. Las sesiones se abrieron con una discusión sobre las curvas de aprendizaje. El estimador de costes de IBM demostró que SMT había estado trabajando con una curva de aprendizaje del 90 por ciento. Pero defendía que debería ser posible pasar a una curva del 85 por ciento, dado que con un pedido de 80 unidades serían posibles largas tandas de producción, reducidos tiempos de preparación, y creciente continuidad de los trabajadores en el trabajo. El propietario estuvo de acuerdo con este análisis y se avino a reducir su precio un 4 por ciento.

Sin embargo, a medida que se discutía cada una de las operaciones del proceso, se iba poniendo de manifiesto que algunas de las estimaciones de costes de IBM eran demasiado bajas porque no se habían tenido en cuenta algunos gastos de embalaje y envío. Sin embargo, estos olvidos eran poco importantes, y en las siguientes conversaciones, las dos partes llegaron a un acuerdo sobre las especificaciones y los costes de cada operación de fabricación.

En ese momento, los representantes de SMT expresaron una gran preocupación sobre la posibilidad de inflación en los costes de materiales. Los negociadores de IBM se prestaron a incluir una fórmula de escalamiento de precios en el contrato, previamente pactada entre ellos. Los representantes de IBM sugirieron que si los costes generales de materiales variaban más allá de un 10 por ciento, el precio podría ajustarse en consecuencia. Sin embargo, si una de las partes tomaba la iniciativa de hacer revisar los precios, la otra podría pedirle un análisis de todas las facturas de piezas y materiales utilizadas para llegar al nuevo precio.

Otra preocupación de los representantes de SMT era que sería necesaria una gran cantidad de horas extras y de subcontrataciones para cumplir con el plan de entregas solicitado por IBM. Los negociadores de IBM pensaron que sería posible una relajación en el programa de entregas si pudiesen obtener alguna concesión sobre el precio. En respuesta, el equipo de SMT ofreció un 5 por ciento de descuento, que fue aceptado. Como resultado de estas negociaciones, el precio de SMT se redujo casi un 20 por ciento por debajo del precio original de la oferta.

En una reunión posterior convocada para negociar los precios de algunos tubos que tenían que utilizarse en el sistema, un estimador de costes de IBM observó que los representantes de SMT habían subestimado gravemente sus costes. Señaló este evidente error porque no entendía por qué SMT había ofrecido una cifra tan baja. Quería estar seguro de que SMT estaba siguiendo el proceso de producción correcto. En cualquier caso, si los estimadores de SMT habían cometido algún error, debería conocerse. La política de IBM consistía en buscar un precio justo tanto para ellos mismos como para sus proveedores. Los directivos de compras de IBM creían que si un proveedor estaba perdiendo dinero en un trabajo, habría cierta tendencia a recortar la calidad. Además, el negociador de IBM estaba seguro de que, al señalar el error, generaba cierta buena voluntad que podría ser de utilidad para futuras negociaciones.

Preguntas para el debate

1. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas para IBM y SMT con este enfoque?
2. ¿En qué se parece/diferencia la tasa de aprendizaje de SMT a la de otras empresas?
3. ¿Cuáles son las limitaciones de la curva de aprendizaje en este caso?

Fuente: Adaptado de E. Raymond Corey, *Procurement Management: Strategy, Organization, and Decision Making* (Nueva York: Van Nostrand Reinhold).



BIBLIOGRAFÍA

Abernathy, W. J., y K. Wayne. "Limits of the Learning Curve". *Harvard Business Review* 52 (septiembre-octubre 1974): pp. 109-119.

Bailey, C. D. y E. N. McIntyre. "Using Parameter Prediction Models to Forecast Post-interruption Learning". *IIE Transactions* 35 (diciembre 2003): p. 1077.

Camm, J. "A Note on Learning Curve Parameters". *Decision Sciences* (verano 1985): pp. 325-327.

Hall, G., y S. Howell. "The Experience Curve from the Economist's Perspective". *Strategic Management Journal* (julio-septiembre 1985): pp. 197-210.

Lapré, Michael A., Amit Shankar Mukherjee, y Luk N. Van Wassenhove. "Behind the Learning Curve: Linking Learning Activities to Waste Reduction". *Management Science* 46, n.º 5 (mayo 2000): pp. 597-611.

McDonald, A., y L. Schrattenholzer. "Learning Curves and Technology Assessment". *International Journal of Technology Management* 23 (2002): p. 718.

Smith, J. *Learning Curve for Cost Control*. Norcross, Georgia: Industrial Engineering and Management Press, Institute of Industrial Engineers (1998).

Smunt, T. L., y C. A. Watts. "Improving Operations Planning with Learning Curves". *Journal of Operations Management* 21 (enero 2003): p. 93.

Weston, M. *Learning Curves*. New York: Crown Publishing (2000).

Zangwill, W. I., y P. B. Kantor. "Toward a Theory of Continuous Improvement and the Learning Curve". *Management Science* 44, n.º 7 (julio 1998): pp. 910-920.



RECURSOS EN INTERNET

Bailey, Charles (University of Central Florida):
www.bus.ucf.edu/bailey

NASA:
www.jsc.nasa.gov/bu2/learn.html

Production technology, Tampa, Florida:
www.protech-ie.com/software.htm

MÓDULO CUANTITATIVO F

SIMULACIÓN

CONTENIDO DEL MÓDULO

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Cuando acabe este capítulo, debe ser capaz de:

Identificar o definir:

La simulación de Monte Carlo

Los números aleatorios

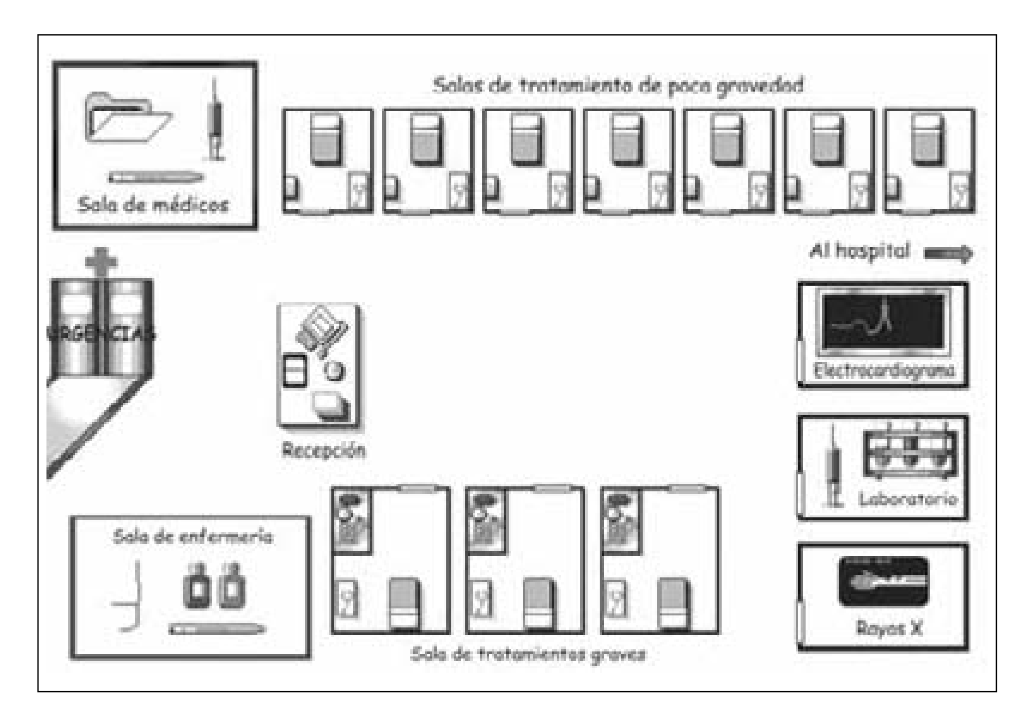
El intervalo de números aleatorios

El software de simulación

Describir o explicar:

Ventajas e inconvenientes de la modelización con simulación

La utilización de hojas de cálculo Excel en simulación



Cuando el Bay Medical Center se enfrentó a importantes problemas de masificación en su clínica ambulatoria, decidió recurrir a la simulación informática para intentar reducir los cuellos de botella y mejorar el flujo de pacientes. Un lenguaje de simulación llamado Micro Saint analizó los datos existentes de los tiempos de servicio dedicados a los pacientes en las diversas salas de atención médica. Simulando disponer de distintos números de médicos y de personal, simulando recurrir a los servicios de otra clínica en casos de afluencia excesiva de enfermos, y simulando un nuevo diseño de la clínica existente, el Bay Medical Center pudo tomar decisiones en las que se tuvieran en cuenta tanto los costes como los beneficios. Esto se tradujo en un mejor servicio a los pacientes a un menor coste.

Fuente: Micro Analysis and Design Simulation Software, Inc., Boulder, CO.

Existen muchos tipos de simulación y, aunque este módulo ponga el énfasis en las simulaciones de Monte Carlo, debería tener en cuenta también las simulaciones "físicas" (como, por ejemplo, un modelo de túnel de viento para pruebas aerodinámicas).

Los modelos de simulación abundan en nuestro mundo. Así, por ejemplo, la ciudad de Atlanta los utiliza para controlar el tráfico. La empresa Airbus Industries de Europa se sirve de ellos para probar la aerodinámica de los reactores propuestos. El ejército de Estados Unidos simula juegos de guerra en computadoras. Los estudiantes de administración de empresas utilizan juegos de gestión empresarial para simular situaciones reales de competencia en el mundo de los negocios. Y miles de organizaciones, como el Bay Medical Center, desarrollan modelos de simulación para ayudar a tomar decisiones operativas.

La mayoría de las grandes empresas en el mundo utilizan modelos de simulación. La Tabla F.1 ofrece una lista de unas cuantas áreas en las que se está aplicando actualmente la simulación.

Simulación
Intento de reproducir los rasgos, aspecto y características de un sistema real, generalmente a través de un modelo informatizado.

¿QUÉ ES LA SIMULACIÓN?

La **simulación** es el intento de reproducir los rasgos, aspecto y características de un sistema real. En este módulo mostraremos cómo simular parte de un sistema de dirección de operaciones elaborando un modelo matemático que represente tanto como sea posible al

TABLA F.1 ■ Alguna aplicaciones de la simulación

Localización y programación de ambulancias	Diseño de la gestión bibliotecaria
Equilibrado de líneas de montaje	Programación de los servicios de taxis, camiones y ferrocarril
Diseño de zonas de aparcamiento y de puertos	Programación de plantas de fabricación
Diseño de los sistemas de distribución	Layout de plantas
Programación aeronáutica	Inversiones de capital
Decisiones sobre contratación de personal	Programación de la producción
Planificación de personal	Previsión de ventas
Sincronización de semáforos	Planificación y control de inventarios
Predicción de tendencias de voto	
Programación de líneas de autobús	

sistema en cuestión. El modelo se utilizará, a continuación, para evaluar los efectos de diferentes acciones. La idea sobre la que se basa la simulación es triple:

1. Imitar, con una representación matemática, una situación del mundo real.
2. A continuación estudiar sus propiedades y características operativas, y
3. Finalmente, sacar conclusiones y tomar decisiones de acción basadas en los resultados de la simulación.

De esta manera, no hará falta actuar sobre el sistema de la vida real hasta que primero se hayan valorado en el modelo las ventajas y los inconvenientes de una importante decisión estratégica.

Para utilizar la simulación, el director de operaciones debe

1. Definir el problema.
2. Plantear las variables importantes asociadas al problema.
3. Elaborar un modelo numérico.
4. Establecer posibles líneas de actuación para probarlas.
5. Realizar el experimento.
6. Analizar los resultados (modificando, posiblemente, el modelo o cambiando los datos de input).
7. Decidir la línea de actuación a seguir.

Estas etapas se muestran en la Figura F.1.

Los problemas abordados por la simulación pueden ir desde los muy sencillos a los enormemente complejos, desde las colas en los cajeros de los bancos hasta un análisis de la economía de los Estados Unidos de América. Aunque las pequeñas simulaciones se pueden hacer manualmente, la utilización eficaz de esta técnica exige el uso de computadoras. Los modelos a gran escala, simulando quizás años de decisiones de negocio, son tratados prácticamente todos con computadora.

En este módulo analizamos los principios básicos de la simulación y a continuación pasamos a estudiar algunos problemas en las áreas del análisis de colas y del control de inventarios. ¿Por qué utilizamos la simulación en esas áreas cuando los modelos matemáticos descritos en otros capítulos pueden resolver problemas similares? La respuesta es que la simulación proporciona un enfoque alternativo para problemas que son muy complejos matemáticamente. La simulación puede, por ejemplo, resolver problemas de inventario cuando la demanda o los plazos de entrega no son constantes.

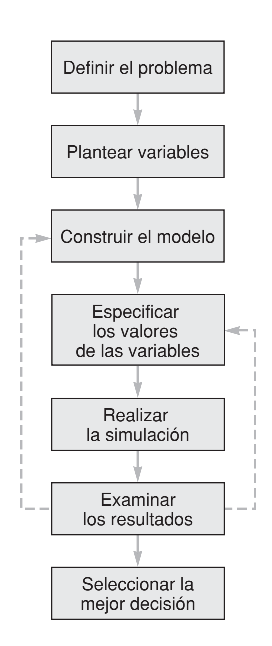


FIGURA F.1 ■ Proceso de simulación

El coste de simular un accidente frontal de un automóvil en Ford era de 60.000 dólares en 1985. En 1998, el suceso pudo ser simulado por 200 dólares. Ahora cuesta menos de 10 dólares. Utilizando la nueva supercomputadora de Ford, la simulación se realiza ahora en unos pocos minutos.

Se han desarrollado modelos de simulación informática para tratar una serie de problemas de productividad en los restaurantes de comida rápida, como Burger King. En uno de ellos se simuló la distancia ideal entre el puesto donde se efectúa el pedido desde el automóvil y la ventanilla de recogida del pedido. Por ejemplo, dado que una distancia mayor reducía el tiempo de espera, se podían atender a 12 o 13 clientes más por hora, lo que representaba un beneficio de más de 20.000 dólares al año en el capítulo de ventas adicionales por restaurante. En otra simulación se consideró un segundo punto de encargo desde el automóvil. Con este modelo se vaticinaba un aumento de las ventas de un 15 por ciento.

El método de Monte Carlo
Técnica de simulación que utiliza elementos aleatorios cuando existe el azar en su comportamiento.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA SIMULACIÓN

La simulación es una herramienta que ha sido ampliamente aceptada por los directivos por diferentes razones. Las *ventajas* principales de la simulación son las siguientes:

1. La simulación es relativamente sencilla y flexible.
2. Puede emplearse para analizar grandes y complejas situaciones del mundo real que no se pueden resolver mediante los modelos convencionales de dirección de operaciones.
3. Pueden incluirse complejidades del mundo real que la mayoría de los modelos de dirección de operaciones no pueden permitir. Por ejemplo, la simulación puede utilizar *cualquier* distribución de probabilidad que defina el usuario. No requiere distribuciones estándar.
4. Con la simulación resulta posible "comprimir el tiempo". Los efectos de las políticas de dirección de operaciones durante varios meses o años, se pueden obtener a través de la simulación con computadora en muy poco tiempo.
5. La simulación permite hacer preguntas hipotéticas del tipo "¿qué ocurriría si...?" A los directivos les gusta saber por anticipado cuáles van a ser las opciones más atractivas. Con un modelo informático, un directivo puede probar, en cuestión de minutos, diferentes decisiones sobre la política a seguir.
6. Las simulaciones no interfieren en los sistemas del mundo real. Así, puede resultar demasiado perjudicial, por ejemplo, experimentar físicamente con nuevas estrategias o nuevas ideas en un hospital o en una planta manufacturera.
7. Con la simulación podemos estudiar los efectos interactivos de componentes individuales o de variables, para determinar cuáles son importantes.

Los *inconvenientes* principales de la simulación son los siguientes:

1. Los buenos modelos de simulación pueden ser muy caros y requerir muchos meses para su desarrollo.
2. Es un método de prueba y error que puede producir diferentes soluciones al realizarse repetidamente. La simulación no genera soluciones óptimas a los problemas, como hace la programación lineal.
3. Los directivos deben crear todas las condiciones y restricciones para las soluciones que desean examinar. El modelo de simulación no proporciona respuestas si no se introducen datos adecuados y realistas.
4. Cada modelo de simulación es único. Sus soluciones y conclusiones no suelen ser transferibles a otros problemas.

SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

Cuando un sistema contiene elementos que presentan *aleatoriedad* en su comportamiento, puede aplicarse el **método De Monte Carlo** de simulación. La base de la simulación De Monte Carlo es la experimentación sobre los elementos aleatorios (o *probabilísticos*) mediante un muestreo aleatorio.

La técnica se compone de cinco sencillos pasos:

1. Establecer una distribución de probabilidad para las variables importantes.
2. Construir una distribución de probabilidad acumulada para cada variable.
3. Establecer un intervalo de números aleatorios (equiprobables) para cada variable.

4. Generar números aleatorios.
5. Simular el experimento.

Vamos a analizar estos pasos sucesivamente.

Paso 1. Establecer distribuciones de probabilidad. La idea fundamental en la simulación de Monte Carlo es generar valores para las variables que constituyen el modelo objeto de estudio. En los sistemas del mundo real, una gran cantidad de variables son probabilísticas por naturaleza. Por nombrar sólo algunas: demanda de inventario; plazo de entrega de los pedidos que han de llegar; tiempos entre averías de las máquinas; tiempos entre llegadas de los clientes a la instalación de servicio; tiempos de realización de los servicios; tiempos necesarios para completar las actividades de un proyecto; y número de empleados ausentes diariamente.

Una forma habitual de establecer una *distribución de probabilidad* para una variable dada es mediante el análisis de los datos históricos. La probabilidad, o frecuencia relativa, de cada valor posible de una variable se halla dividiendo la frecuencia de la observación por el número total de observaciones. Pongamos un ejemplo.

La demanda diaria de neumáticos en Barry's Auto Tire durante los 200 últimos días viene indicada en las columnas 1 y 2 de la Tabla F.2. Suponiendo que las tasas de llegadas pasadas se mantendrán en el futuro, podemos convertir esta demanda en una distribución de probabilidad dividiendo la frecuencia de cada demanda por la demanda total, es decir, 200. Los resultados se indican en la columna 3.

TABLA F.2 ■ Demanda de Barry's Auto Tyre

(1) Demanda de neumáticos	(2) Frecuencia	(3) Probabilidad de ocurrencia	(4) Probabilidad acumulada
0	10	10/200 = 0,05	0,05
1	20	20/200 = 0,10	0,15
2	40	40/200 = 0,20	0,35
3	60	60/200 = 0,30	0,65
4	40	40/200 = 0,20	0,85
5	30	30/200 = 0,15	1,00
	200 días	200/200 = 1,00	

Para determinar una distribución de probabilidad para los neumáticos, suponemos que la demanda histórica constituye un buen indicador de los resultados futuros.

Distribución de probabilidad acumulada
Acumulación de las probabilidades individuales de una distribución.

Intervalos de números aleatorios
Conjunto de números para representar cada posible valor o resultado en una simulación informatizada.

Número aleatorio
Serie de dígitos que han sido seleccionados por un proceso totalmente aleatorio.

Paso 2. Construir una distribución de probabilidad acumulada para cada variable. La conversión de una distribución de probabilidad, tal como la de la columna 3 de la Tabla F.2, a una distribución de probabilidad acumulada es una tarea sencilla. En la columna 4 observamos que la probabilidad acumulada para cada nivel de demanda es la suma del número que aparece en la columna de probabilidad (columna 3) para ese nivel de demanda y de la probabilidad acumulada para el nivel anterior.

Paso 3. Establecer intervalos de números aleatorios (equiprobables). Una vez que hemos establecido la distribución de probabilidad acumulada para cada variable que aparece en la simulación, debemos asignar una serie de números que represente a cada posible valor o resultado. Esto se denomina crear los **intervalos de números aleatorios**. Básicamente, una **serie de números aleatorios** es una serie de dígitos (por ejemplo, dos dígitos desde 01, 02, ..., 98, 99, 00) que han sido seleccionados por un proceso totalmente aleato-

rio, un proceso en el que cualquier número aleatorio tiene idéntica posibilidad de resultar elegido.

Puede empezar intervalos de números aleatorios tanto en 01 como en 00, pero el texto empieza en 01, de manera que la cota superior de cada intervalo constituye la probabilidad acumulada.

Si, por ejemplo, existe un 5 por ciento de posibilidades de que la demanda de neumáticos de Barry's Auto Tire sea de 0 unidades por día, entonces querremos que el 5 por ciento de los números aleatorios disponibles corresponda a una demanda de 0 unidades. Si se utiliza un total de 100 números de dos dígitos en la simulación, podríamos asignar una demanda de 0 unidades a los cinco primeros números aleatorios: 01, 02, 03, 04, y 05[1]. Entonces se crearía una demanda simulada de 0 unidades cada vez que se sacara uno de los números del 01 al 05. Si también existe una probabilidad del 10 por ciento de que la demanda del mismo producto sea de 1 unidad por día, podríamos decir que los próximos 10 números aleatorios (06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14 y 15) representan esa demanda, y así sucesivamente para los otros niveles de demanda.

Análogamente, podemos observar en la Tabla F.3 que la longitud de cada intervalo en la derecha corresponde a la probabilidad de 1 de cada una de las posibles demandas diarias. Así pues, al asignar números aleatorios a la demanda diaria de 3 neumáticos, la gama del intervalo de números aleatorios (del 36 al 65) corresponde *exactamente* a la probabilidad (o proporción) de ese resultado. Una demanda diaria de 3 neumáticos se produce un 30 por ciento de las veces. Los 30 números aleatorios mayores de 35 y hasta el 65 inclusive se asignan a este evento de una demanda de 3 neumáticos.

TABLA F.3 ■ Asignación de intervalos de números aleatorios para Barry's Auto Tyre

Demanda diaria	Probabilidad acumulada	Intervalo de probabilidad	Números aleatorios
0	0,05	0,05	01 a 05
1	0,10	0,15	06 a 15
2	0,20	0,35	16 a 35
3	0,30	0,65	36 a 65
4	0,20	0,85	66 a 85
5	0,15	1,00	86 a 00

Paso 4. Generar números aleatorios. Se pueden generar números aleatorios para problemas de simulación de dos formas. Si el problema es grande y el problema que se está estudiando implica muchas tandas de simulación, se dispondrá de programas informáticos que generen los números aleatorios necesarios. Si la simulación se efectúa manualmente, los números pueden seleccionarse de una tabla de dígitos aleatorios.

Paso 5. Simular el experimento. Podemos simular los resultados de un experimento mediante una simple selección de los números aleatorios de la Tabla F.4. Empezando en un punto cualquiera de la tabla, observamos el intervalo en el que cae cada número en la Tabla F.3. Por ejemplo, si el número aleatorio escogido es 81 y el intervalo de 66 a 85 representa una demanda diaria de 4 neumáticos, entonces seleccionamos una demanda de 4 neumáticos. El Ejemplo F1 muestra un poco más lo que es la simulación.

---

[1] Análogamente, podríamos haber asignado los números aleatorios 00, 01, 02, 03 y 04 para que representaran una demanda de 0 unidades. Los dos dígitos 00 pueden considerarse un número entre 0 y 100. Mientras se asignen 5 de los 100 números a la demanda 0, no importa de qué cinco números se trate.

TABLA F.4 ■ Asignación de intervalos de números aleatorios para Barry's Auto Tire

52	06	50	88	53	30	10	47	99	37	66	91	35	32	00	84	57	07
37	63	28	02	74	35	24	03	29	60	74	85	90	73	59	55	17	60
82	57	68	28	05	94	03	11	27	79	90	87	92	41	09	25	36	77
69	02	36	49	71	99	32	10	75	21	95	90	94	38	97	71	72	49
98	94	90	36	06	78	23	67	89	85	29	21	25	73	69	34	85	76
96	52	62	87	49	56	59	23	78	71	72	90	57	01	98	57	31	95
33	69	27	21	11	60	95	89	68	48	17	89	34	09	93	50	44	51
50	33	50	95	13	44	34	62	64	39	55	29	30	64	49	44	30	16
88	32	18	50	62	57	34	56	62	31	15	40	90	34	51	95	26	14
90	30	36	24	69	82	51	74	30	35	36	85	01	55	92	64	09	85
50	48	61	18	85	23	08	54	17	12	80	69	24	84	92	16	49	59
27	88	21	62	69	64	48	31	12	73	02	68	00	16	16	46	13	85
45	14	46	32	13	49	66	62	74	41	86	98	92	98	84	54	33	40
81	02	01	78	82	74	97	37	45	31	94	99	42	49	27	64	89	42
66	83	14	74	27	76	03	33	11	97	59	81	72	00	64	61	13	52
74	05	81	82	93	09	96	33	52	78	13	06	28	30	94	23	37	39
30	34	87	01	74	11	46	82	59	94	25	34	32	23	17	01	58	73
59	55	72	33	62	13	74	68	22	44	42	09	32	46	71	79	45	89
67	09	80	98	99	25	77	50	03	32	36	63	65	75	94	19	95	88
60	77	46	63	71	69	44	22	03	85	14	48	69	13	30	50	33	24
60	08	19	29	36	72	30	27	50	64	85	72	75	29	87	05	75	01
80	45	86	99	02	34	87	08	86	84	49	76	24	08	01	86	29	11
53	84	49	63	26	65	72	84	85	63	26	02	75	26	92	62	40	67
69	84	12	94	51	36	17	02	15	29	16	52	56	43	26	22	08	62
37	77	13	10	02	18	31	19	32	85	31	94	81	43	31	58	33	51

Fuente: Reproducido de *A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates,* Rand (Nueva York: The Free Press, 1995). Reproducción autorizada.

EJEMPLO F1

Simulación de la demanda de neumáticos en la tienda

Veamos con más detalle el concepto de números aleatorios simulando 10 días de la demanda de neumáticos en la Barry's Auto Tire (*véase* la Tabla F.3). Seleccionamos los números aleatorios necesarios de la Tabla F.4 empezando por el ángulo superior izquierdo y continuando hacia abajo por la primera columna.

Número de día	Número aleatorio	Demanda diaria simulada
1	52	3
2	37	3
3	82	4
4	69	4
5	98	5
6	96	5
7	33	2
8	50	3
9	88	5
10	90	5
		39 Demanda total de 10 días
		39/10 = 3,9 = demanda diaria media de neumático

Resulta interesante observar que la demanda media de 3,9 neumáticos en este simulación de 10 días difiere de manera significativa de la demanda diaria *esperada*, que podemos calcular a partir de los datos de la Tabla F.3:

$$\text{Demanda esperada} = \sum_{i=1}^{5} (\text{probabilidad de } i \text{ unidades}) \times (\text{demanda de } i \text{ unidades})$$
$$= (0{,}5)(0) + (0{,}10)(1) + (0{,}20)(2) \times (0{,}30)(3) + (0{,}20)(4) + (0{,}15)(5)$$
$$= 0 + 0{,}1 + 0{,}4 + 0{,}9 + 0{,}8 + 0{,}75$$
$$= 2{,}95 \text{ neumáticos}$$

Sin embargo, si esta simulación se repitiera cientos o miles de veces, la demanda media simulada sería casi la misma que la demanda *esperada*.

Naturalmente, resultaría arriesgado sacar conclusiones definitivas y rápidas respecto a las operaciones de una empresa tomando como base una pequeña simulación como la del ejemplo F1. Es improbable que alguien quiera realmente realizar el esfuerzo de simular un modelo tan simple conteniendo una sola variable. La simulación manual muestra, sin embargo, los principales principios involucrados, y puede resultar útil en estudios a pequeña escala.

SIMULACIÓN DE UN PROBLEMA DE COLAS

Una importante aplicación de la simulación es el análisis de los problemas de líneas de espera. Como vimos en el Módulo D, las hipótesis requeridas para resolver los problemas de colas son bastante restrictivas. En los sistemas de colas más realistas, la simulación constituye quizás el único planteamiento disponible.

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

SIMULACIÓN DE OPERACIONES EN UN RESTAURANTE DE TACO BELL

La determinación del número de empleados que deben programarse cada cuarto de hora para realizar cada una de las funciones de un restaurante Taco Bell constituye un problema complejo y controvertido. Así que Taco Bell, el gigante con una capitalización de 5.000 millones de dólares y 6.500 filiales en todo el mundo, incluyendo Estados Unidos, decidió desarrollar un modelo de simulación. Seleccionó, para ello, el software MODSIM para desarrollar un nuevo sistema de gestión de la mano de obra denominado LMS.

Para poner a punto y utilizar un modelo de simulación, Taco Bell tuvo que reunir una gran cantidad de datos. Casi todo lo que ocurre en un restaurante, desde los patrones de llegadas de clientes hasta el tiempo que se tarda en envolver un "taco" (tortilla rellena con harina de maíz), debió ser traducido a datos exactos y fiables. Como ejemplo, digamos que los analistas tuvieron que realizar estudios de tiempo y análisis de datos para cada tarea que forma parte de la preparación de cada artículo del menú. Para sorpresa del investigador, las horas destinadas a reunir los datos superaron con creces a las que se necesitaron para construir el modelo LMS.

Los inputs a LMS incluyen la plantilla, es decir, el número de personas y puestos que ocupan. Los outputs son medidas de rendimientos, tales como tiempo medio en el sistema, tiempo medio en el mostrador, utilización del personal y utilización del equipo. El modelo mereció la pena. Se ahorraron más de 53 millones de dólares en costes laborales durante los 4 primeros años de uso del LMS.

Fuentes: OR/MS Today (junio de 2000):30 y (octubre de 1997): 20-21; e *Interfaces,* 28, 1 (enero-febrero de 1998): 75-91.

El Ejemplo F2 ilustra el empleo de la simulación en un gran muelle de descarga y en su cola correspondiente. La llegada de las barcazas al muelle no sigue una distribución de Poisson, y los ritmos de descarga (tiempos de servicio) no son exponenciales ni constantes. Por lo tanto, no pueden utilizarse los modelos matemáticos de colas del Módulo D.

EJEMPLO F2

Una simulación con dos variables

Habiendo salido de las ciudades industriales del medio oeste y tras un largo trayecto Mississippi abajo, las barcazas, totalmente cargadas, arriban por la noche al puerto de Nueva Orleans. El número de barcazas que atraca en una noche cualquiera fluctúa entre 0 y 5. La Tabla F.5 nos indica la probabilidad de 0, 1, 2, 3, 4 y 5 llegadas. En la misma tabla indicamos las probabilidades acumuladas y los intervalos de números aleatorios correspondientes a cada número de llegadas posible.

TABLA F.5 ■ Tasas de llegadas nocturnas de barcazas e intervalos de números aleatorios

Número de llegadas	Probabilidad	Probabilidad acumulada	Intervalo de números aleatorios
0	0,13	0,13	01 a 13
1	0,17	0,30	14 a 30
2	0,15	0,45	31 a 45
3	0,25	0,70	46 a 70
4	0,20	0,90	71 a 90
5	0,10	1,00	91 a 00
	1,00		

Un estudio realizado por el encargado del muelle revela que el número de barcazas descargadas tiende también a variar de un día a otro. En la Tabla F.6 el encargado facilita información de la que podemos crear una distribución de probabilidad para la variable *tasa de descarga diaria.* Igual que hicimos con la variable de llegadas, podemos establecer un intervalo de números aleatorios para las tasas de descarga.

TABLA F.6 ■ Tasas de descarga e intervalos de números aleatorios

Tasas descarga diaria	Probabilidad	Probabilidad acumulada	Intervalo de números aleatorios
1	0,05	0,05	01 a 05
2	0,15	0,20	06 a 20
3	0,50	0,70	21 a 70
4	0,20	0,90	71 a 90
5	0,10	1,00	91 a 00
	1,00		

La relación entre los intervalos de números aleatorios y la probabilidad acumulada es que el extremo superior de cada intervalo es igual al porcentaje de la probabilidad acumulada.

Las barcazas se descargan siguiendo el método FIFO (primera que llega, primera que se descarga). Toda barcaza no descargada el día de llegada deberá esperar al día siguiente. Sin embargo, el amarre de las barcazas al muelle acarrea importantes costes, de tal manera que el encargado no puede ignorar las llamadas telefónicas de los enfadados propietarios de las barcazas recordándole que el "tiempo es oro". El encargado decide que antes de dirigirse al controlador

del puerto de Nueva Orleans para solicitar personal extra para las operaciones de descarga, debería efectuar un estudio de simulación de llegadas, descargas y demoras. Una simulación de 100 días sería lo ideal, pero, para a fines ilustrativos, el encargado empieza con un análisis más reducido de quince días. Los números aleatorios se toman de la línea superior de la Tabla F.4 para generar las tasas de llegadas diarias. Para crear las tasas de descarga diaria, se sacan de la segunda línea de la Tabla F.4. La Tabla F.7 nos muestra el día a día de la simulación portuaria.

TABLA F.7 ■ Simulación de colas en las operaciones de descarga de barcazas en el puerto de Nueva Orleans

(1) Día	(2) Número pendiente del día anterior	(3) Número aleatorio	(4) Número de llegadas nocturnas	(5) Total para ser descargado	(6) Número aleatorio	(7) Número descargado
1	—[a]	52	3	3	37	3
2	0	06	0	0	63	0[b]
3	0	50	3	3	28	3
4	0	88	4	4	02	1
5	3	53	3	6	74	4
6	2	30	1	3	35	3
7	0	10	0	0	24	0[c]
8	0	47	3	3	03	1
9	2	99	5	7	29	3
10	4	37	2	6	60	3
11	3	66	3	6	74	4
12	2	91	5	7	85	4
13	3	35	2	5	90	4
14	1	32	2	3	73	3[d]
15	0	00	5	5	59	3
	20 Total retrasos		41 Total llegadas			39 Total descargas

[a] Podemos empezar sin retrasos del día anterior. En una larga simulación, incluso si empezáramos con cinco retrasos de la noche precedente, esa situación inicial se compensaría.
[b] Se podrían haber descargado tres barcazas en el segundo día. Sin embargo, como no hubo llegadas y no había nada pendiente, no se efectuaron operaciones de descarga.
[c] Se produce la misma situación que en la nota b.
[d] Esta vez, se podrían haber descargado 4 barcazas, pero como sólo había 3 haciendo cola, el número de barcazas descargadas se registra como 3.

Es probable que el encargado esté interesado en, por lo menos, tres datos de utilidad e importancia:

$$\begin{pmatrix}\text{Número medio de barcazas}\\ \text{demoradas al día siguiente}\end{pmatrix} = \frac{20 \text{ retrasos}}{15 \text{ días}}$$

$$= 1{,}33 \text{ barcazas demoradas por día}$$

$$\text{Número medio de llegadas nocturnas} = \frac{41 \text{ llegadas}}{15 \text{ días}}$$

$$= 2{,}73 \text{ llegadas nocturnas}$$

$$\text{Número medio de llegadas nocturnas} = \frac{41 \text{ llegadas}}{15 \text{ días}}$$

$$= 2{,}60 \text{ operaciones de descarga por día.}$$

Cuando los datos del Ejemplo F2 son analizados en términos de costes de demora, costes de inactividad de la mano de obra y costes de contratar mano de obra suplementaria para la descarga, el encargado del muelle y el controlador del puerto pueden tomar una mejor decisión respecto a las necesidades de personal. Pueden incluso optar por volver a simular el proceso asumiendo tasas de descarga diferentes que correspondan a equipos con más personal de descarga. Aunque la simulación no pueda garantizar una solución óptima a problemas como éste, puede servir para la recreación de un proceso e identificar buenas alternativas de decisión.

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE INVENTARIO

En el Capítulo 2 de este volumen introdujimos los modelos de inventario. Los habitualmente utilizados modelos EOQ parten del supuesto de que tanto la demanda del producto como el plazo de aprovisionamiento son conocidos y constantes. No obstante, en la mayoría de las situaciones de inventario del mundo real, la demanda y el plazo son variables, de manera que efectuar un análisis exacto es algo muy difícil de hacer con cualquier herramienta diferente a la simulación.

En este apartado presentamos un problema de inventario con dos variables de decisión y dos componentes probabilísticos. Al dueño de la ferretería del Ejemplo F3 le gustaría adoptar decisiones sobre la *cantidad de pedido* y el *punto de pedido* para un producto concreto que tiene una demanda diaria y un plazo de entrega probabilísticos (variables). Quiere realizar una serie de secuencias de simulación, ensayando con varias cantidades de pedido y puntos de pedido, para minimizar sus costes totales de inventario para el producto en cuestión. Los costes de inventario en este caso incluirán los costes de lanzamiento, de almacenamiento y de rotura de existencias.

EJEMPLO F3

Una simulación de inventario con dos variables

Simkin's Hardware vende la taladradora eléctrica modelo Ace. La demanda diaria de la taladradora es relativamente baja pero sujeta a cierta variabilidad. Durante los 300 últimos días, Simkin ha anotado las ventas indicadas en la columna 2 de la Tabla F.8. Ha transformado la frecuencia histórica en una distribución de probabilidad para la variable demanda diaria (columna 3). Se crea una distribución de probabilidad acumulada en la columna 4 de la Tabla F.8. Finalmente, Simkin establece un intervalo de números aleatorios para representar cada posible demanda diaria (columna 5).

TABLA F.8 ■ Probabilidades e intervalos de números aleatorios para la demanda de taladradoras Ace

(1) Demanda de taladradoras Ace	(2) Frecuencia	(3) Probabilidad	(4) Probabilidad acumulada	(5) Intervalo de números aleatorios
0	15	0,05	0,05	01 a 05
1	30	0,10	0,15	06 a 15
2	60	0,20	0,35	16 a 35
3	120	0,40	0,75	36 a 75
4	45	0,15	0,90	76 a 90
5	30	0,10	1,00	91 a 00
	300 días	1,00		

Cuando Simkin hace un pedido de reposición para su inventario de taladradoras, hay un periodo de entrega de 1 a 3 días, lo que significa que el plazo de aprovisionamiento puede considerarse también una variable probabilística. El número de días que se tardó en recibir los 50 últimos pedidos está reflejado en la Tabla F.9. De forma análoga a la creación de la variable de demanda, Simkin establece una distribución de probabilidad de la variable plazo de entrega (columna 3 de la Tabla F.9), calcula la distribución acumulada (columna 4) y asigna intervalos de números aleatorios para cada posible plazo (columna 5).

TABLA F.9 ■ Probabilidades e intervalos de números aleatorios para los plazos de entrega

(1) Plazo de entrega (días)	(2) Frecuencia	(3) Probabilidad	(4) Probabilidad acumulada	(5) Intervalo de números aleatorios
1	10	0,20	0,20	01 a 20
2	25	0,50	0,70	21 a 70
3	15	0,30	1,00	71 a 00
	50 pedidos	1,00		

La primera política de inventario que Simkin quiere simular es una cantidad de pedido de 10 con un punto de pedido de 5. Es decir, siempre que el nivel de inventario disponible al final de la jornada sea de 5 o menos, Simkin llamará a su proveedor esa misma noche y hará un pedido de 10 taladradoras. Observe que si el plazo de entrega es de 1 día, el pedido no llegará a la mañana siguiente, sino a primera hora del siguiente día laborable.

El proceso completo está simulado para un periodo de 10 días en la Tabla F.10. Suponemos que el inventario inicial es de 10 unidades el primer día. Tomamos los números aleatorios (columna 4) de la columna 2 de la Tabla F.4.

La Tabla F.10 se rellena completando cada vez un día (o línea) y yendo de izquierda a derecha. Es un proceso de cuatro fases:

1. Comenzar comprobando cada día simulado si ha llegado algún pedido. Si ha llegado, sumar al inventario actual la cantidad del pedido (10 unidades, en este caso).
2. Generar una demanda diaria a partir de la distribución de probabilidad de demanda seleccionando un número aleatorio.
3. Calcular el inventario final que ha de ser igual al inventario inicial menos la demanda. Si el inventario disponible no basta para satisfacer la demanda del día, satisfacer tanta demanda como sea posible y anotar la cantidad de venta perdida.
4. Determinar si el inventario al final del día ha alcanzado el punto de pedido (5 unidades). Si así es, y si no hay pedidos pendientes, lanzar un pedido. Se simula el plazo de entrega del nuevo pedido escogiendo un número aleatorio y utilizando la distribución de la Tabla F.9.

La primera simulación de inventario de Simkin proporciona algunos interesantes resultados. El inventario medio al final del día es el siguiente:

$$\text{Inventario medio final del día} = \frac{41 \text{ unidades totales}}{10 \text{ días}} = 4{,}1 \text{ unidades/día}$$

TABLA F.10 ■ Primera simulación de inventario de Simkin's Hardware. Cantidad de pedido = 10 unidades; punto de pedido = 5 unidades

(1) Día	(2) Unidades recibidas	(3) Inventario inicial	(4) Número aleatorio	(5) Demanda	(6) Inventario final	(7) Ventas perdidas	(8) ¿Pedido?	(9) Número aleatorio	(10) Plazo de entrega
1		10	06	1	9	0	No		
2	0	9	63	3	6	0	No		
3	0	6	57	3	3 [a]	0	Sí	02 [b]	1
4	0	3	94 [c]	5	0	2	No [d]		
5	10 [e]	10	52	3	7	0	No		
6	0	7	69	3	4	0	Sí	33	2
7	0	4	32	2	2	0	No		
8	0	2	30	2	0	0	No		
9	10 [f]	10	48	3	7	0	No		
10	0	7	88	4	3	0	Sí	14	1
				Totales:	41	2			

[a] Ésta es la primera vez que el inventario bajó por debajo del punto de pedido de 5 taladradoras. Se lanza un pedido porque no había ninguno pendiente.

[b] Se genera el número aleatorio 02 para representar el primer plazo de entrega. Se extrajo de la columna 2 de la Tabla F.4 como el siguiente número de la lista que se debía utilizar. Si hubiéramos querido se podría haber utilizado una columna separada a partir de la cual obtener los números aleatorios de los plazos de entrega, cosa que no se ha hecho en este ejemplo.

[c] Una vez más, observe que los dígitos aleatorios 02 se emplearon para el plazo de entrega (*véase* la nota b). Por lo tanto, el siguiente número en la columna es el 94.

[d] No se lanza níngun pedido el día 4 porque hay un pedido pendiente del día anterior que todavía no ha llegado.

[e] El plazo de entrega del primer pedido formulado es de 1 día, pero, tal como se ha indicado en el texto, el pedido no llega a la mañana siguiente, sino a primera hora del día posterior. Así pues, el primer pedido llega al empezar el quinto día.

[f] Llegada del pedido lanzado al final del sexto día. Por suerte para Simkin, no se produjo pérdida alguna de ventas durante los 2 días de plazo de entrega, antes de que llegara el pedido.

También mostramos el número medio de pedidos realizados por día y la media de ventas perdidas:

$$\text{Media de ventas perdidas} = \frac{2 \text{ unidades en ventas perdidas}}{10 \text{ días}} = 0{,}2 \text{ unidades/día}$$

$$\text{Número medio de pedidos realizados} = \frac{3 \text{ pedidos}}{10 \text{ días}} = 0{,}3 \text{ pedidos/día}$$

El Ejemplo F4 muestra cómo estos datos pueden resultar útiles en el estudio de los costes de inventario de la política que se está simulando.

EJEMPLO F4

Incorporación de costes al Ejemplo F3

Simkin estima que el coste de lanzar cada pedido de taladradoras Ace es de 10 dólares, el coste de almacenamiento por cada taladradora en stock al final del día es de 0,50 dólares, y el coste por

cada venta perdida es de 8 dólares. Esta información nos permite calcular el coste total de inventario por día para la política simulada en el Ejemplo F3. Examinemos los tres componentes del coste:

Coste de lanzamiento diario = (coste de lanzar un pedido) × (número de pedidos lanzados por día)
= 10 dólares por pedido × 0,3 pedidos por día = 3 dólares

Coste de almacenamiento diario = (coste de almacenamiento de una unidad por día) × (inventario final medio)
= 50¢ por unidad por día × 4,1 unidades diarias = 2,05 dólares

Coste de rotura de stock por día = (coste por venta perdida) × (media de ventas perdidas por día)
= 8 dólares por venta perdida × 0,2 ventas perdidas por día = 1,60 dólares

Coste total de inventario diario = Coste de lanzamiento diario + Coste de almacenamiento diario + Coste de rotura de stock diario = 6,65 dólares

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN EN ACCIÓN

SIMULACIÓN DE LOS QUIRÓFANOS DEL HOSPITAL JACKSON MEMORIAL

El Hospital Jackson Memorial de Miami, el hospital más grande de Florida, con 1.576 camas para pacientes hospitalizados, también es uno de los mejores de Estados Unidos. En 1996 recibió la mayor puntuación de acreditación posible de todos los hospitales públicos del país. El equipo de dirección de operaciones del Hospital Jackson está buscando constantemente formas de aumentar la eficiencia del hospital, y la construcción de nuevos quirófanos dio lugar al desarrollo de una simulación para los 31 quirófanos existentes.

La sección de quirófanos del hospital tiene una zona para espera de pacientes y una zona para recuperación de pacientes, y ambas zonas estaban experimentando problemas debido a la ineficaz programación de los servicios de quirófanos. Un estudio de simulación, modelizado utilizando el programa informático ARENA, pretendía maximizar la utilización de los quirófanos y del personal. Los inputs del modelo incluían (1) la cantidad de tiempo que un paciente espera en la zona de espera, (2) el proceso específico de intervención del paciente, (3) el programa de los trabajadores, (4) la disponibilidad de salas y (5) la hora del día.

El primer obstáculo que tenía que superar el equipo directivo de Jackson fue el enorme número de historiales que tenía que revisar para extraer la información necesaria para el modelo de simulación. El segundo obstáculo fue la *calidad* de los datos. Un análisis riguroso de los historiales determinó cuáles eran buenos y cuáles debían ser descartados. Al final, el cuidadoso examen de las bases de datos de Jackson permitió obtener un buen conjunto de datos de entrada para el modelo. El modelo de simulación definió a continuación cinco medidas de rendimiento: (1) número de operaciones quirúrgicas al día, (2) tiempo medio de cada caso, (3) utilización del personal, (4) utilización de las salas y (5) tiempo medio de espera en la zona de espera.

Fuentes: M. A. Centeno *et al.*, "Challenges of Simulating Hospital Facilities", *Proceedings of the 12th Annual Conference of the Production and Operations Management Society*. Orlando, FL, marzo de 2001; y *Knight Ridder Tribune Business Service* (29 de enero de 2002): 1.

Ahora que hemos examinado bien el Ejemplo F3, quisiéramos recalcar algo muy importante: Esta simulación debería durar muchos más días antes de que sacáramos cualquier conclusión respecto al coste de la política de pedidos que se está probando. Si se lleva a cabo una simulación manual, 100 días proporcionarían una mejor representación. Si se están realizando los cálculos con una computadora, 1.000 días podrían ayudarnos a conseguir unas estimaciones exactas de los costes. (Además, recordemos que incluso con una simulación de 1.000 días, se debe comparar la distribución generada y la distribución deseada para asegurar unos resultados válidos).

Supongamos que Simkin realiza una simulación de 1.000 días de la política del Ejemplo F3 (cantidad del pedido = 10 taladradoras; punto de pedido = 5 taladradoras). ¿Completa esto su análisis? La respuesta es negativa; se trata sólo del comienzo. Simkin deberá ahora comparar *esta* estrategia potencial con otras posibilidades. Por ejemplo, ¿qué ocurre con una cantidad de pedido = 10, y un punto de pedido = 4? ¿O una cantidad de pedido = 12, y un punto de pedido = 6? ¿O una cantidad de pedido = 14, y un punto de pedido = 5? Quizás debería simularse cualquier combinación de valores, de una cantidad de pedido de 6 a 20 taladradoras y unos puntos de pedido de 3 a 10. Tras simular todas las combinaciones razonables de cantidades de pedido y de puntos de pedido, Simkin probablemente seleccionaría el par que produjera el coste total de inventario más bajo. Más adelante en este módulo, en el Problema F.12, tendremos la oportunidad de ayudar a Simkin a comenzar esta serie de comparaciones.

RESUMEN

La simulación implica la elaboración de modelos matemáticos que intentan actuar como los sistemas de operaciones reales. De esta forma, se puede estudiar una situación del mundo real sin "molestar" al sistema real. Aunque los modelos de simulación se pueden desarrollar manualmente, la simulación informática suele ser más adecuada. El enfoque de Monte Carlo utiliza números aleatorios para representar variables, tales como la demanda o la gente que está esperando en una cola, las cuales son entonces simuladas en una serie de pruebas. La simulación se utiliza ampliamente como una herramienta operativa porque sus ventajas suelen compensar a sus desventajas.



Simulación *(p. 458)*
Método de Monte Carlo *(p. 460)*
Distribución de probabilidad acumulada *(p. 461)*
Intervalos de números aleatorios *(p. 461)*
Número aleatorio *(p. 462)*

CÓMO UTILIZAR EL SOFTWARE EN LA SIMULACIÓN

Las computadoras son imprescindibles para simular tareas complicadas. Pueden generar números aleatorios, simular miles de periodos de tiempo en cuestión de segundos o de minutos, y proporcionar a la dirección de las empresas informes que mejoran la toma de decisiones. Un planteamiento informatizado constituye casi una necesidad si se quieren sacar conclusiones válidas de una simulación.

Los lenguajes de programación de computadoras pueden ayudar en el proceso de simulación. Los *lenguajes de propósito general*, tales como BASIC o C++, son uno de los posibles enfoques. Los *lenguajes de simulación de propósito especial*, tales como el GPSS y el SIMSCRIPT, tienen unas cuantas ventajas: (1) necesitan un tiempo menor de programación para grandes simulaciones, (2) suelen ser más eficientes y más sencillo comprobar los errores, y (3) los generadores de números aleatorios ya van incorporados como subrutinas.

Se dispone también de programas comerciales de simulación preescritos fáciles de utilizar. Algunos son generalistas con objeto de resolver una amplia variedad de situaciones que van desde problemas de colas hasta problemas de inventarios. Los nombres de algunos de estos programas son: Extend, Modsim, Witness, MAP/1, Enterprise Dynamics, Simfactory, ProModel, Micro Saint y ARENA. El último recuadro sobre *Dirección de producción en acción* al final de este módulo, "Simulación de los quirófanos en el Hospital Jackson Memorial", describe una aplicación del programa ARENA.

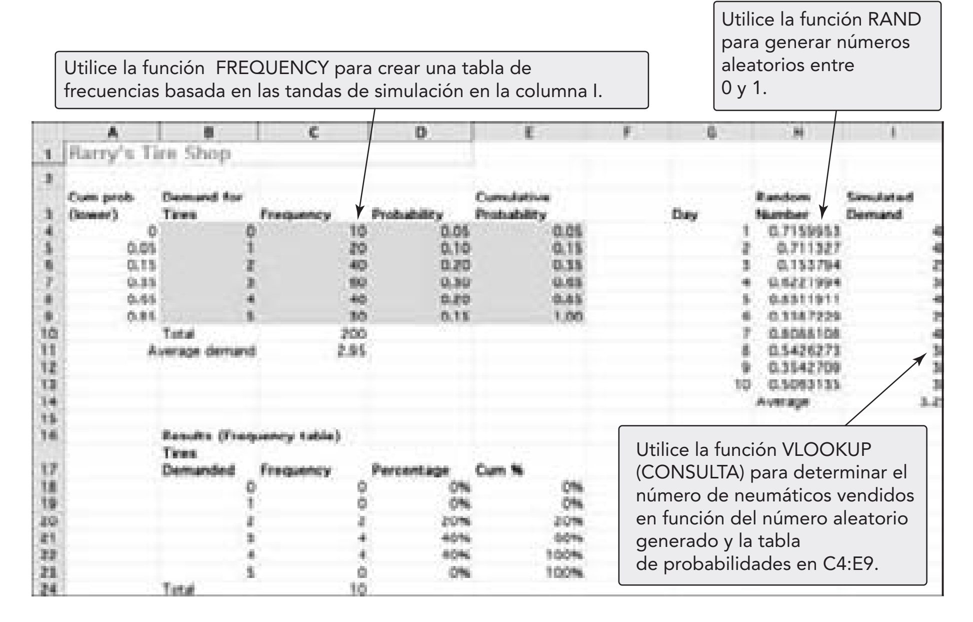
El software de hojas de cálculo, como Excel, puede utilizarse asimismo para desarrollar simulaciones de forma rápida y fácil. Estos paquetes disponen de generadores de números aleatorios incorporados, y desarrollan los outputs a través de comandos de registro de datos en tablas (*data-fill table commands*).



Cómo utilizar las hojas de cálculo de Excel

La capacidad para generar números aleatorios y luego "buscar" estos números en una tabla, para asociarlos con un evento concreto, convierte a las hojas de cálculo en herramientas excelentes para realizar las simulaciones. Excel OM no dispone de un módulo de simulación porque podemos modelizar directamente todos los problemas de simulación en Excel. El Programa F.1 muestra una simulación Excel para el Ejemplo F1.

El resultado muestra una media simulada de 3,2 neumáticos por día.



PROGRAMA F.1 ■ Cómo utilizar Excel para simular la demanda de neumáticos para Auto Tire

Value	Cell	Excel Formula	Action
Cumulative probability	A4	=0	
Cumulative probability	A5	=A4+D4	Copy to A6:A9
Random Number	H4	=RAND()	Copy to H5:H13
Demand	I4	=VLOOKUP(H4,$A$4:$B$9,2,TRUE)	Copy to I5:I13
Average	I14	=AVERAGE(I4:I13)	
Frequency	C18	=FREQUENCY($I$4:$I$13,$B$18:$B$23)	Array copy to C19:C23
Total	C24	=SUM(C18:C23)	
Percentage	D18	=C18/$C$24	Copy to D19:D23
Average simulated demand	D25	=SUMPRODUCT(B18:B23,D18:D23)	
Cumulative Percentage	E18	=D18	
Cumulative Percentage	E19	=E18+D19	Copy to E20:E23
			Press the F9 Key to simulate

Observe que las probabilidades acumuladas están calculadas en la columna E del Programa F.1. Este procedimiento reduce las posibilidades de error y resulta de utilidad en grandes simulaciones que incluyen más niveles de demanda.

La función = VLOOKUP en la columna I busca el número aleatorio (generado en la columna H) en la columna más a la izquierda de la tabla de consulta definida ($A$4:$B$9). La función = VLOOKUP se mueve en sentido descendente a través de esta columna hasta que encuentra una celda que sea mayor que el número aleatorio. Va entonces a la fila anterior y toma de allí el valor de la columna B de la tabla.

En la columna H, por ejemplo, el primer número aleatorio mostrado es 0,716. Excel recorrió en sentido descendente la columna de la izquierda de la tabla de consulta ($A$4-$B$9) del Programa F.1 hasta que encontró 0,85. De la fila anterior, recuperó el valor en la columna B que es 4. Al pulsarse la tecla de función F9, se vuelven a calcular los números aleatorios y la simulación.



Cómo utilizar POM para Windows para la simulación

El programa POM para Windows es capaz de tratar cualquier simulación que contenga sólo una variable aleatoria, tal como el Ejemplo F1. Para más detalles, *véase* el Apéndice IV.

PROBLEMAS RESUELTOS

Problema Resuelto F.1

Higgins Plumbing and Heating mantiene un stock de calentadores de agua de 30 galones de capacidad que vende e instala a particulares. Al propietario Jerry Higgins le gusta la idea de disponer de un amplio surtido para satisfacer cualquier demanda de los clientes, pero también reconoce que eso resulta caro. Tras un examen de las ventas de calentadores realizadas durante las 50 últimas semanas, dispone de la siguiente información:

Calentadores de agua vendidos por semana	Número de semanas en las que se vendió este número
4	6
5	5
6	9
7	12
8	8
9	7
10	3
	50 semanas de datos totales

a) Si Higgins mantiene un aprovisionamiento semanal constante de 8 calentadores de agua para cualquier semana, ¿cuántas veces se quedará sin existencias durante un periodo de simulación de 20 semanas? Utilizamos números aleatorios extraídos de la séptima columna de la Tabla F.4, empezando por el dígito aleatorio 10.

b) ¿Cuál es la media de ventas por semana durante un periodo de 20 semanas?

c) Si utilizamos una técnica analítica de no simulación, ¿cuál será el número de ventas esperado por semana? ¿Cómo se compara este valor con la respuesta dada en el apartado b)?

Solución

Ventas de calentadores	Probabilidad	Intervalos de números aleatorios
4	0,12	De 01 a 12
5	0,10	De 13 a 22
6	0,18	De 23 a 40
7	0,24	De 41 a 64
8	0,16	De 65 a 80
9	0,14	De 81 a 94
10	0,06	De 95 a 00
	1,00	

a)

Semana	Número aleatorio	Ventas simuladas	Semana	Número aleatorio	Ventas simuladas
1	10	4	11	08	4
2	24	6	12	48	7
3	03	4	13	66	8
4	32	6	14	97	10
5	23	6	15	03	4
6	59	7	16	96	10
7	95	10	17	46	7
8	34	6	18	74	8
9	34	6	19	77	8
10	51	7	20	44	7

Con un aprovisionamiento de 8 calentadores, Higgins agotará sus existencias tres veces durante el periodo de 20 semanas (en la séptima, decimocuarta y decimosexta semana).

b) Media de ventas por simulación = ventas totales/20 semanas = 135/20 = 6,75 por semana

c) Utilizando valores esperados

$$\begin{aligned} E\text{ (ventas)} &= 0{,}12(4\text{ calentadores}) + 0{,}10(5) \\ &\quad + 0{,}18(6) + 0{,}24(7) + 0{,}16(8) \\ &\quad + 0{,}14(9) + 0{,}6(10) = 6{,}88\text{ calentadores} \end{aligned}$$

Con una simulación mayor, ambos métodos llevarán a valores que aún se aproximarían más.

Problema Resuelto F.2

Los números aleatorios se pueden utilizar para simular distribuciones continuas. Por poner un ejemplo sencillo, supongamos que el coste fijo es igual a 300 dólares, la contribución a los beneficios es de 10 dólares por cada artículo vendido, y que se espera unas ventas igualmente probable desde 0 a 99 unidades. Es decir que el beneficio equivale a –300$ + 10*X*$, siendo *X* el número de unidades vendidas. La cantidad media que se espera vender es de 49,5 unidades.

a) Calcule el valor esperado.
b) Simule la venta de 5 artículos, utilizando los siguientes números aleatorios de dos dígitos:
37 77 13 10 85
c) Calcule el valor esperado del apartado b) y compárelo con los resultados del apartado a).

Solución

a) Valor esperado = −300 + 10(49,5) = 195$

b) −300 + 10$(37) = 70$
−300 + 10$(77) = 470$
−300 + 10$(13) = 170$
−300 + 10$(10) = 200$
−300 + 10$(85) = 550$

c) La media de estas ventas simuladas es de 144 dólares. Si el tamaño de la muestra fuera mayor, esperaríamos que los dos valores estuvieran más próximos.

EJERCICIOS EN INTERNET Y DEL CD-ROM DEL ALUMNO

Visite nuestro sitio web o utilice su CD-ROM del alumno para obtener material sobre este capítulo.


En nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer**

- Preguntas de autoevaluación
- Problemas de práctica
- Problemas en Internet
- Casos de estudio en Internet

En su CD-ROM del alumno

- Lección en PowerPoint
- Problemas de práctica
- POM para Windows

CUESTIONES PARA EL DEBATE

1. Defina, en orden, los siete pasos que debe seguir un directivo cuando utiliza la simulación para analizar un problema.
2. ¿Cuáles son las ventajas de la simulación?
3. ¿Cuáles son las limitaciones de la simulación?
4. Explique la diferencia entre demanda media *simulada* y demanda media *esperada*.
5. ¿Cuál es el papel de los números aleatorios en una simulación de Monte Carlo?
6. ¿Por qué pueden cambiar los resultados de una simulación en cada iteración?
7. ¿Qué es una simulación de Monte Carlo? ¿En qué principios está basado su uso, y qué pasos hay que seguir para aplicarla?
8. Ofrezca seis ejemplos de aplicación de la simulación en el mundo de los negocios.
9. ¿Por qué es tan utilizada la técnica de la simulación?

10. ¿Qué ventajas presentan los lenguajes de simulación de propósito especial?

11. En la simulación de la política de pedidos de taladradoras de Simkin's Hardware (Ejemplo F3), ¿cambiarían significativamente los resultados (de la Tabla F.10) si se simulara un periodo más largo? ¿Por qué o por qué no es válida la simulación de diez días?

12. ¿Por qué es necesaria una computadora para realizar una simulación en el mundo real?

13. Explique por qué podría verse obligado un director a utilizar la simulación en vez de un modelo analítico a la hora de resolver un problema de

a) política de pedidos para inventario
b) llegadas de buques para descargar en un puerto
c) ventanillas de cajeros en los bancos
d) la economía estadounidense.



PROBLEMAS*

Los problemas que siguen se refieren a simulaciones que se pueden hacer manualmente. Sin embargo, para conseguir resultados exactos y significativos, se deben simular largos periodos de tiempo, tarea que suele realizarse mediante una computadora. Si es capaz de programar algunos de los problemas en Excel o en un lenguaje informático con el que esté familiarizado, sugerimos que intente hacerlo. En caso contrario, la simulación manual le ayudará a entender el proceso de simulación.

• **F.1.** La demanda diaria de bocadillos de atún en la máquina expendedora de la cafetería de la Universidad Roosevelt es de 8, 9, 10 u 11, con unas probabilidades de 0,4, 0,3, 0,2 o 0,1, respectivamente. Supongamos que se han generado los siguientes números aleatorios: 09, 55, 73, 67, 53, 59, 04, 23, 88 y 84. Utilizando estos números, genere las ventas diarias de bocadillos durante 10 días.

• **F.2.** El número diario de averías de las máquinas en la fábrica de Kristen Hodge es de 0, 1 o 2, con unas probabilidades de 0,5, 0,3 o 0,2, respectivamente. Se han generado los siguientes números aleatorios: 13, 14, 02, 18, 31, 19, 32, 85, 31 y 94. Utilice estos números para generar el número de averías durante 10 días consecutivos. ¿Qué proporción de esos días tuvo, por lo menos, una avería?

• **F.3.** La siguiente tabla muestra los resultados parciales de una simulación de Monte Carlo. Suponga que la simulación empezaba a las 8:00 horas y sólo hay un servidor.

Número de cliente	Hora de llegada	Tiempo del servicio
1	8:01	6
2	8:06	7
3	8:09	8
4	8:15	6
5	8:20	6

a) ¿Cuándo empieza el servicio para el tercer cliente?
b) ¿Cuándo se irá el quinto cliente?
c) ¿Cuál es el tiempo medio de espera en la cola?
d) ¿Cuál es el tiempo medio en el sistema?

* *Nota:* **P** significa que se puede resolver el problema con el programa POM para Windows; [Excel OM icon] significa que se puede resolver el problema con Excel OM; **P** significa que se puede resolver el problema con POM para Windows y/o Excel OM.

• **F.4.** Barbara Flynn vende periódicos en un puesto por 0,35 dólares el ejemplar. Cada ejemplar le cuesta 0,25 dólares, con un beneficio de 0,10 dólares por unidad vendida. Basándose en su experiencia, Barbara sabe que:

a) El 20 por ciento de las veces vende 100 periódicos.
b) El 20 por ciento de las veces vende 150 periódicos.
c) El 30 por ciento de las veces vende 200 periódicos.
d) El 30 por ciento de las veces vende 250 periódicos.

Asumiendo que Barbara cree que el coste de una venta perdida es de 0,05 dólares y que los periódicos no vendidos le cuestan 0,25 dólares, simule su estimación de beneficios durante 5 días si hace un pedido de 200 ejemplares para cada uno de esos 5 días. Utilice los siguientes números aleatorios: 52, 06, 50, 88 y 53.

: **F.5.** El Hospital Infantil está estudiando el número de kits de cirugía para urgencias que utiliza en los fines de semana. Durante los 40 últimos fines de semana el número de kits utilizado ha sido el siguiente:

Número de kits	Frecuencia
4	4
5	6
6	10
7	12
8	8

Se han generado los siguientes números aleatorios: 11, 52, 59, 22, 03, 03, 50, 86, 85, 15, 32 y 47. Simule el uso de kits de urgencias durante 12 noches. ¿Cuál es el número medio de kits utilizado durante estas doce noches?

• **F.6.** La tienda de ultramarinos de Susan Sherer ha registrado las siguientes cifras con respecto al número de clientes que llega a las tres cajas de salida, y ha comprobado el tiempo que se tarda en despacharlos:

Llegadas/min.	Frecuencia
0	0,3
1	0,5
2	0,2

Tiempo de servicio en min.	Frecuencia
1	0,1
2	0,3
3	0,4
4	0,2

Simule la utilización de las tres cajas de salida durante 5 minutos, sirviéndose de los siguientes números aleatorios: 07, 60, 77, 49, 76, 95, 51, 16 y 14. Muestre los resultados al final del periodo de 5 minutos. Empiece en el instante 0.

• **F.7.** El director de un almacén de Mary Beth Marrs Corp. tiene que simular la demanda de un producto que no se ajusta a los modelos estándares. El concepto que se está midiendo es el de "demanda durante el plazo de entrega", donde tanto el plazo de entrega como la demanda diaria son variables. El historial de este producto, junto con la distribución acumulada, se muestra en la siguiente tabla. Se han generado números aleatorios para simu-

lar los cinco siguientes ciclos de pedido; son 91, 45, 37, 65 y 51. ¿Cuáles son los cinco valores de la demanda? ¿Cuál es su media?

Demanda durante el plazo de entrega	Probabilidad	Probabilidad acumulada
100	0,01	0,01
120	0,15	0,16
140	0,30	0,46
160	0,15	0,61
180	0,04	0,65
200	0,10	0,75
220	0,25	1,00

: **F.8.** El tiempo que transcurre entre las llegadas de automóviles a la ventanilla de autoservicio del restaurante de comida rápida de Barry Harmon sigue la distribución indicada en la tabla de abajo. Se señala asimismo la distribución de los tiempos de servicio. Utilice los números aleatorios facilitados para simular la actividad de las cuatro primeras llegadas. Suponga que la ventanilla se abre a las 11:00 horas, y que la primera llegada se produce más tarde, basándose en el primer tiempo entre llegadas generado.

Tiempo entre llegadas	Probabilidad	Tiempo de servicio	Probabilidad
1	0,2	1	0,3
2	0,3	2	0,5
3	0,3	3	0,2
4	0,2		

Números aleatorios para las llegadas: 14, 74, 27, 03.
Números aleatorios para los tiempos de servicio: 88, 32, 36, 24.

¿A qué hora deja el sistema el cuarto cliente?

• **F.9.** Phantom Controls controla y repara las cajas de los circuitos de control de ascensores en los grandes edificios del centro de Chicago. La empresa tiene un contrato para 108 edificios. Cuando falla una caja, Phantom instala una nueva y repara la unidad defectuosa en su instalación de reparaciones de Gary, Indiana. Los datos sobre cajas defectuosas durante los dos últimos años figuran en la siguiente tabla:

Número de cajas defectuosas por mes	Probabilidad
0	0,10
1	0,14
2	0,26
3	0,20
4	0,18
5	0,12

Simule 2 años (24 meses) de operaciones de Phantom y calcule el número medio de cajas defectuosas por mes a partir de la simulación. ¿Fue normal tener menos de 7 averías durante periodos de 3 meses de operación? (Inicie su simulación en la parte superior de la décima columna de la Tabla F.4, Número Aleatorio = 37, y vaya hacia abajo en la tabla).

• **F.10.** El número de automóviles que llegó al túnel de lavado de Terry Haugen durante las 200 últimas horas de funcionamiento es el siguiente:

Número de llegadas de automóviles	Frecuencia
3 o menos	0
4	20
5	30
6	50
7	60
8	40
9 o más	0
	200

a) Determine la distribución de probabilidad y la de probabilidad acumulada para la variable llegada de automóviles.
b) Establezca intervalos de números aleatorios para la variable.
c) Simule 15 horas de llegadas de automóviles y calcule el número medio de llegadas por hora. Seleccione los números aleatorios que necesita en la columna 1, Tabla F.4, empezando con el número 52.

: **F.11.** El quiosco de periódicos de Leonard Presby utiliza una sencilla previsión para pedir los periódicos del día siguiente. El número de periódicos pedido corresponde a la demanda del día anterior. Hoy la demanda de periódicos fue de 22. Presby compra los periódicos a 0,2 dólares y los vende por 0,5. Siempre que hay una demanda insatisfecha, Presby estima que la reputación perdida le cuesta 0,10 dólares. Termine la siguiente tabla y responda a las preguntas.

Demanda	Probabilidad
21	0,25
22	0,15
23	0,10
24	0,20
25	0,30

Día	Periódicos pedidos	Número aleatorio	Demanda	Ingresos	Coste	Coste de reputación	Beneficio neto
1	22	37					
2		19					
3		52					
4		8					
5		22					
6		61					

a) ¿Cuál es la demanda del día 3?
b) ¿Cuál es el beneficio total neto al final de los 6 días?
c) ¿Cuál es el coste de la reputación perdida el día 6?
d) ¿Cuál es el beneficio neto del día 2?
e) ¿Cuántos periódicos ha pedido Presby para el día 5?

F.12. Simkin's Hardware simuló una política de pedidos para las taladradoras eléctricas Ace que consistía en una cantidad de pedido de 10 taladradoras, y un punto de pedido de 5. Este primer intento de elaborar una estrategia de pedidos eficaz en costes se mostró en la Tabla F.10 del Ejemplo F3. Esa breve simulación se tradujo en un coste diario total de inventario de 6,65 dólares en el Ejemplo F4.

A Simkin le gustaría comparar ahora esta estrategia con otra en la que pidiera 12 taladradoras con un punto de pedido de 6. Realice una simulación de 10 días y analice a continuación las consecuencias sobre los costes.

F.13. En la Eastern State University, durante los ocho últimos años se han agotado las entradas en todos los partidos de fútbol americano jugados por el equipo en casa. Los ingresos por venta de entradas son significativos, pero la venta de comida, bebida y artículos de recuerdo ha contribuido en gran medida a la rentabilidad general del fútbol. Un souvenir concreto es el programa de cada partido. El número de programas vendidos en cada partido está descrito por la distribución de probabilidad de la siguiente tabla:

Número de programas vendidos	Probabilidad
2.300	0,15
2.400	0,22
2.500	0,24
2.600	0,21
2.700	0,18

Cuesta 0,8 dólares producir cada programa, y se venden por 2 dólares. Los programas que no se venden se donan a un centro de reciclaje y no generan ingresos.

a) Simule las ventas de programas en 10 partidos. Utilice la última columna de la tabla de números aleatorios (Tabla F.4) y empiece en la parte superior de la columna.

b) Si la universidad decidiera imprimir 2.500 programas para cada partido, ¿cuál sería el beneficio medio de los 10 partidos simulados?

c) Si la universidad decidiera imprimir 2.600 programas para cada partido, ¿cuál sería el beneficio medio de los 10 partidos simulados?

F.14. Vuelva a los datos del Problema Resuelto F.1, que se ocupa de Higgins Plumbing and Heating. Higgins ahora ha reunido 100 semanas de información y llega a los siguientes resultados sobre la distribución de las ventas:

Ventas de calentadores por semana	Número de semanas en que se vendió este número	Ventas de calentadores por semana	Número de semanas en que se vendió este número
3	2	8	12
4	9	9	12
5	10	10	10
6	15	11	5
7	25		100

a) Suponiendo que Higgins mantiene un aprovisionamiento constante de 8 calentadores por semana, vuelva a simular el número de veces que se han agotado las existencias durante un periodo de 20 semanas.

b) Realice esta simulación de 20 semanas dos veces más y compare sus respuestas con las registradas en el apartado a). ¿Cambiaron significativamente? ¿Por qué o por qué no?

c) ¿Cuál es el nuevo número esperado de ventas por semana?

F.15. Taboo Tattoo & Tanning tiene dos camas de bronceado. Una cama atiende de forma exclusiva a los clientes habituales de la empresa. La segunda cama atiende exclusivamente a los clientes esporádicos (que no tienen cita) con un sistema de primero en llegar, primero en ser atendido. Gary Clendene, director del local, ha observado en varias ocasiones que durante las cinco horas más ajetreadas del día (de las dos a las siete de la tarde), los potenciales clientes esporádicos a menudo se van del local si ven que ya hay una persona esperando a la segunda cama. Se pregunta si la captura de esta demanda perdida justificará una tercera cama adicional. El alquiler y mantenimiento de una cama de bronceado cuesta a Taboo 600 dólares al mes. El precio que paga el cliente varía en función del tiempo que permanezca en la cama, pero Gary ha calculado un ingreso neto medio de 2 dólares por cada 10 minutos de bronceado. Un estudio del patrón de llegadas durante las horas de máxima ocupación y del tiempo pasado en el bronceado ha revelado los siguientes datos:

Tiempo entre llegadas (minutos)	Probabilidad	Tiempo de bronceado (minutos)	Probabilidad
5	0,30	10	0,20
10	0,25	15	0,30
15	0,20	20	0,40
20	0,15	25	0,10
25	0,10		

a) Simule 4 horas de actividad (llegadas durante 4 horas). Utilice la decimocuarta columna de la Tabla F.4 para los tiempos entre llegadas y la octava columna para los tiempos de bronceado. Suponga que acaba de empezar a broncearse un cliente a las dos de la tarde y ha contratado una sesión de 20 minutos. Indique los clientes que renunciaron a esperar a que la cama estuviera libre. ¿Cuántos clientes se han perdido en las 4 horas?

b) Si el local abre una media de 24 días al mes, ¿justificará la captura de todas las ventas perdidas el colocar otra cama de bronceado?

F.16. Erin Davis es propietaria y directora de uno de los mayores concesionarios de Mercedes Benz en Nebraska. En los 36 últimos meses, sus ventas han oscilado de un mínimo de 6 a un máximo de 12 automóviles nuevos, como se indica en la siguiente tabla:

Ventas de automóviles nuevos/mes	Frecuencia
6	3
7	4
8	6
9	12
10	9
11	1
12	1
	36 meses

Davis cree que las ventas continuarán durante los 24 próximos meses a aproximadamente las mismas tasas históricas, y que los plazos de entrega continuarán también con el ritmo siguiente (indicados en forma de probabilidad):

Plazos de entrega (en meses)	Probabilidad
1	0,44
2	0,33
3	0,16
4	0,07
	1,00

La política actual de Davis es encargar 14 automóviles a la vez (dos cargas de camión enteras, con 7 automóviles en cada camión) y hacer un nuevo pedido en cuanto las existencias disponibles llegan a 12 unidades. ¿Cuáles son los resultados de esta política cuando se simula durante los 2 próximos años?

F.17. Volvamos al Problema F.16. Davis establece los siguientes costes: (1) el coste mensual de almacenamiento de un Mercedes es de 600 dólares; (2) el coste medio por la pérdida de una venta es de 4.350 dólares; y (3) el coste de hacer un pedido es de 570 dólares. ¿Cuál es el coste de inventario total de la política simulada en el problema F.16?

F.18. Nos remitiremos de nuevo a los Problemas F.16 y F.17. Davis desea intentar una nueva política simulada: pedir 21 automóviles cada vez, con un punto de pedido de 10 automóviles. ¿Qué política es la mejor: ésta o la formulada en los problemas F.16 y F.17?

F.19. Johnny's Dynamo Dogs tiene una cola de automóviles en su autoservicio. Los clientes que llegan a esta cola en las horas de más ajetreo (de once de la mañana a una de la tarde) piden menús completos o eligen a la carta. Actualmente se vende un 25 por ciento de menús con un margen de contribución medio de 2,25 dólares. Las comidas a la carta producen 3 dólares por menú, pero hace falta más tiempo para prepararlas y esto ralentiza la cola. A continuación se muestran los tiempos entre llegadas registrados durante las tres últimas semanas.

Tiempos entre llegadas para 500 observaciones

Tiempo entre llegadas (minutos)	Número de ocurrencias
1	100
2	150
3	125
4	100
5	25

Además, se han registrado los siguientes tiempos de servicio para las comidas a la carta y los menús del día:

Tiempo de servicio al cliente para 500 órdenes de cada tipo

Tiempo de servicio (minutos)	A la carta	Tiempo de servicio (minutos)	Menús
1	50	1	100
2	125	2	175
3	175	3	125
4	150	4	100

John Cottrell ("Johnny") ha observado que, debido al tráfico en la calle, su local pierde a todos los clientes potenciales que llegan cuando hay 4 automóviles en la cola (es decir, la cola nunca tiene más de 4 clientes).

a) Simule un periodo de una hora para el actual mix de pedidos a la carta y de menús. Para empezar, suponga que hay dos automóviles en la cola, cada uno con un tiempo de servicio de 2 minutos. Calcule el número de comidas servidas, los ingresos de esas comidas y la cantidad de ventas perdidas porque los clientes se van a otra parte.

b) Johnny está analizando la posibilidad de reducir el precio de los menús en 0,25 dólares. Cree que esto aumentará el porcentaje de menús del 25 al 40 por ciento. Esto provocará tiempos de servicio más rápidos y menos ventas perdidas. Utilizando la simulación, determine si este cambio es beneficioso desde el punto de vista financiero. Suponga que los beneficios se producirán durante dos horas al día y en un mes de 20 días.

F.20. El Hospital General de Richmond (Virginia) dispone de un área de urgencias dividida en seis departamentos: (1) una sala de examen inicial en la que se tratan problemas de poca importancia o se establecen diagnósticos; (2) una sala de rayos X; (3) un quirófano; (4) una sala de escayolas; (5) una sala de observación (para recuperaciones y observación general antes de un diagnóstico final o de dar de alta a un paciente); y (6) un departamento de administración (en el que el personal encargado tramita las salidas de los enfermos, cobra las facturas o tramita la documentación del seguro).

La siguiente tabla presenta las probabilidades existentes de que un paciente pase de un departamento a otro:

Desde	Hasta	Probabilidad
Examen inicial en la entrada del área de urgencias	Sala de rayos X	0,45
	Quirófano	0,15
	Sala de observación	0,10
	Departamento de administración	0,30
Departamento de rayos X	Quirófano	0,10
	Sala de escayolas	0,25
	Sala de observación	0,35
	Departamento de administración	0,30
Quirófano	Sala de escayolas	0,25
	Sala de observación	0,70
	Departamento de administración	0,05
Sala de escayolas	Sala de observación	0,55
	Sala de rayos X	0,05
	Departamento de administración	0,40
Sala de observación	Quirófano	0,15
	Sala de rayos X	0,15
	Departamento de administración	0,70

a) Simule el camino seguido por 10 pacientes en el área de urgencias. Proceda, con un paciente cada vez, desde su ingreso en la sala de examen inicial hasta que sale por el departamento de administración. Debe tener en cuenta que un paciente puede entrar en el mismo departamento más de una vez.

b) Determine, con ayuda de los propios datos de la simulación, las posibilidades de que un paciente entre en la sala de rayos X dos veces.

F.21. La dirección del First Syracuse Bank está preocupada por la pérdida de clientes en su oficina principal. Una solución propuesta consiste en añadir una o más ventanillas de caja para automovilistas, de manera que los clientes puedan beneficiarse de un servicio rápido sin tener que aparcar. El presidente David Pentico opina que el banco debe arriesgarse únicamente con el coste de la instalación de un cajero. Su equipo directivo le informa de que el coste (amortizado en un periodo de 20 años) de construir dicha instalación es de 12.000 dólares al año. También cuesta 16.000 dólares al año en salarios y prestaciones el personal necesario en cada nueva ventanilla de caja.

La directora del departamento de Análisis de Gestión, Marilyn Hart, cree que hay dos factores que respaldan la construcción inmediata de dos estaciones de ventanilla de caja para automovilistas. Según un artículo reciente aparecido en la revista *Banking Research*, los clientes que esperan en largas colas en los servicios de ventanilla de caja para automovilistas costarán a los bancos una media de 1 dólar por minuto en concepto de pérdida de su reputación comercial. Además, aunque la instalación de una segunda estación de ventanilla de caja va a costar unos 16.000 dólares adicionales, en concepto de dotación de personal, los costes de amortización de la construcción pueden reducirse a un total de 20.000 dólares anuales si se instalan dos cajeros simultáneamente, en vez de uno solo cada vez. Para completar su análisis, Hart reunió la información referente al número de automovilistas llegados y atendidos en esas condiciones por un banco de la competencia:

Tiempo entre llegadas para 1.000 observaciones

Tiempo entre llegadas (minutos)	Número de ocurrencias
1	200
2	250
3	300
4	150
5	100

Tiempo de servicio al cliente para 1.000 clientes

Tiempo de servicio (minutos)	Número de ocurrencias
1	100
2	150
3	350
4	150
5	150
6	100

a) Simule un periodo de 1 hora, de la una a las dos de la tarde, con un solo cajero para automovilistas

b) Simule un periodo de 1 hora, de la una a las dos de la tarde, con un sistema de dos cajeros.

c) Efectúe un análisis de coste para las dos opciones. Suponga que el banco está abierto 7 horas al día y 200 días al año.

F.22. La empresa Alfredo Fragrance Company sólo fabrica un producto, un perfume llamado Hint of Elegance. Hint of Elegance está compuesto por dos ingredientes secretos mezclados en una fragancia exclusiva que se comercializa en Zurich. La función económica conocida como función Cobb-Douglas describe la producción de Hint of Elegance de la siguiente manera:

$$X = \sqrt{(\text{ingrediente } 1)(\text{ingrediente } 2)}$$

donde X es la cantidad de perfume producido.

La empresa opera a un nivel donde se utilizan 25 unidades diarias del ingrediente 1 y 36 unidades diarias del ingrediente 2. Aunque el precio que paga Alfredo por el ingrediente 1 es fijo a 50 dólares por unidad, el coste del ingrediente 2 y el precio de venta del perfu-

me final son probabilísticos. El precio de venta de Hint of Elegance sigue la siguiente distribución:

Precio de venta ($)	Probabilidad
300	0,2
350	0,5
400	0,4

El coste del ingrediente 2 es:

Coste del ingrediente 2 ($)	Probabilidad
35	0,1
40	0,6
45	0,3

a) ¿Cuál es la ecuación de beneficio para Alfredo Fragrance Company?
b) ¿Cuál es el beneficio esperado para la empresa?
c) Simule el beneficio de la empresa para un periodo de 9 días, utilizando los números aleatorios de la primera fila de la Tabla F.4: 52, 06, 50, 88, 53, 30, 10, 47, 99, 37, 66, 91, 35, 32, 00, 84, 57, 07.
d) ¿Cuál es el beneficio diario esperado a partir de la simulación del apartado anterior?



PROBLEMAS PARA RESOLVER CON INTERNET

Visite en nuestro sitio web **www.prenhall.com/heizer** los problema adicionales: F.23 a F.29.

■ *Caso de estudio* ■

El centro de atención telefónica de Alabama Airlines

La compañía aérea Alabama Airlines inició sus actividades en diciembre de 2001 como empresa que volaba a destinos próximos, con su cuartel general y centro de operaciones (*hub*) localizado en Birmingham. La empresa fue fundada y dirigida por dos antiguos pilotos: David Douglas y George Devenney. Adquirieron una flota de 12 aviones turbohélices de segunda mano y los servicios aeroportuarios a los que Delta Airlines había renunciado como consecuencia de su reducción de tamaño tras los atentados terroristas de 2001.

Con el negocio creciendo rápidamente, Douglas centró su atención en el sistema de reservas "800" de Alabama Airlines. Entre medianoche y las seis de la mañana sólo había habido un agente encargado de reservas por teléfono. La Tabla 1 indica el tiempo transcurrido entre llamadas entrantes durante ese periodo. Observando y cronometrando los tiempos empleados por el agente, Douglas estimó que el tiempo requerido por el agente para procesar las consultas de los pasajeros se distribuía según muestra la Tabla 2.

TABLA 1 ■ Distribución de llamadas entrantes

Tiempo entre llamadas (minutos)	Probabilidad
1	0,11
2	0,21
3	0,22
4	0,20
5	0,16
6	0,10

TABLA 2 ■ Distribución del tiempo de servicio

Tiempo para procesar las consultas de los clientes (en minutos)	Probabilidad
1	0,20
2	0,19
3	0,18
4	0,17
5	0,13
6	0,10
7	0,03

Todos los pasajeros que llaman a Alabama Airlines quedan en espera y son atendidos por riguroso orden de recepción de llamada, salvo que el agente de reservas pueda dar el servicio inmediatamente. Douglas está pensando en si debe incorporar a un segundo agente de servicio para hacer frente a la demanda de los clientes. Para que los clientes estén satisfechos, Alabama Airlines no desea que nadie rebase un tiempo de espera superior a los 3 o 4 minutos, y también quiere mantener una "alta" utilización del operario.

Además, la empresa aérea proyecta una nueva campaña publicitaria en televisión como resultado de la cual espera un incremento en las consultas a la línea telefónica "800". Basándose en unas campañas semejantes efectuadas en el pasado, se espera que la distribución de llamadas entrantes desde medianoche hasta las seis de la mañana sea la indicada en la Tabla 3. (La distribución de los tiempos de servicio continuará siendo la misma).

TABLA 3 ■ Distribución de las llamadas entrantes

Tiempo transcurrido entre las llamadas	Probabilidad
1	0,22
2	0,25
3	0,19
4	0,15
5	0,12
7	0,07

Preguntas para el debate

1. Considerando la distribución original de las llamadas, ¿qué aconsejaría a Alabama Airlines que hiciera con respecto al sistema actual de reservas? Cree un modelo de simulación para analizar el escenario. Describa el modelo minuciosamente y justifique la duración de la simulación, supuestos y medidas rendimiento.
2. ¿Cuáles son sus recomendaciones en cuanto a la utilización de los operadores y la satisfacción del cliente en el caso de que la compañía aérea siga adelante con la campaña publicitaria?

Fuente: Profesor Zbigniew H. Przasnyski, Loyola Marymount University. Reproducción autorizada.

■ CASOS DE ESTUDIO ADICIONALES ■

Visite nuestro sitio web <u>www.prenhall.com/heizer</u> para ver los siguientes casos prácticos de estudio:

- **Saigon Transport:** Esta empresa vietnamita de transportes está intentando determinar el tamaño ideal de su flota de camiones.
- **Eliminación de residuos de Bialis:** Se considera el caso de una empresa alemana que está estudiando la conveniencia de continuar con su oficina en Italia.



BIBLIOGRAFÍA

Al-Zubaidi, H., y D. Tyler. "A Simulation Model of Quick Response Replenishment of Seasonal Clothing". *International Journal of Retail and Distribution Management* 32 (2004): p. 320.

Banks, J., J. S. Carson, B. L. Nelson, y D. M. Nicol. *Discrete-Event System Simulation*, 3.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2001).

Banks, J., y V. Norman. "Justifying Simulation in Today's Manufacturing Environment". *IIE Solutions* (noviembre 1995).

— "Second Look at Simulation Software", *OR/MS Today* 23, 4 (agosto 1996): pp. 55-57.

Evans, J. R., y D. L. Olson. *Introduction to Simulation and Risk Analysis*, 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2002).

Gavirneni, S., D. J. Morrice, y P. Mullarkey. "Simulation Helps Maxager Shorten Its Sales". *Interfaces* 2 (marzo-abril, 2004): pp. 87-96.

Hartvigsen, D. *SimQuick: Process Simulation with Excel – Updated Version*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2001).

Law, A. M., y W. D. Kelton *Simulation Modeling and Analysis*, 3.ª ed. New York: McGraw-Hill (2000).

Martin, E. "Centralized Bakery Reduces Distribution Costs Using Simulation". *Interfaces* 28, n.º 4 (julio-agosto 1998): pp. 38-46.

Render, B., R. M. Stair, y M. Hanna. *Quantitative Analysis for Management*, 9.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Render, B., R. M. Stair, y R. Balakrishnan. *Managerial Decision Modeling with Spreadsheets,* 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (2006).

Saltzman, Robert M. y Vijay Mehrotra. "A Call Center Uses Simulation to Drive Strategic Change." *Interfaces* 31, n.º 3 (mayo-junio 2001): pp. 87-101.

Thompson, G. M., y R. Verma. "Computer Simulation in Hospitality Teaching, Practice and Research". *Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly* 44 (abril, 2003): p. 85.

Winston, Wayne L. *Simulation Modeling Using@Risk*. Pacific Grove, CA: Duxbury (2001).

APÉNDICES

APÉNDICE I
ÁREAS BAJO LA CURVA NORMAL

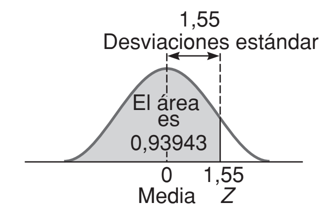
APÉNDICE II
VALORES DE $e^{-\lambda}$ PARA SU UTILIZACIÓN EN LA DISTRIBUCIÓN DE POISSON

APÉNDICE III
TABLA DE NÚMEROS ALEATORIOS

APÉNDICE IV
CÓMO UTILIZAR EXCEL OM Y POM PARA WINDOWS

APÉNDICE V
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS DE NÚMERO PAR

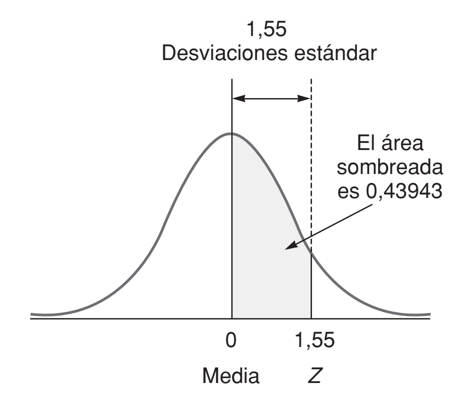
APÉNDICE I ÁREAS BAJO LA CURVA NORMAL



Para determinar el área bajo la curva normal, puede utilizar tanto la Taba I.1 como la Tabla I.2. En la Tabla I.1, debe saber a cuántas desviaciones estándar a la derecha de la media está el punto que calcula. Entonces, el área bajo la curva normal se puede leer directamente en la tabla normal. Por ejemplo, el área total bajo la curva normal para un punto que está a 1,55 desviaciones estándar a la derecha de la media es 0,93943.

TABLA I.1

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,50000	0,50399	0,50798	0,51197	0,51595	0,51994	0,52392	0,52790	0,53188	0,53586
0,1	0,53983	0,54380	0,54776	0,55172	0,55567	0,55962	0,56356	0,56749	0,57142	0,57535
0,2	0,57926	0,58317	0,58706	0,59095	0,59483	0,59871	0,60257	0,60642	0,61026	0,61409
0,3	0,61791	0,62172	0,62552	0,62930	0,63307	0,63683	0,64058	0,64431	0,64803	0,65173
0,4	0,65542	0,65910	0,66276	0,66640	0,67003	0,67364	0,67724	0,68082	0,68439	0,68793
0,5	0,69146	0,69497	0,69847	0,70194	0,70540	0,70884	0,71226	0,71566	0,71904	0,72240
0,6	0,72575	0,72907	0,73237	0,73536	0,73891	0,74215	0,74537	0,74857	0,75175	0,75490
0,7	0,75804	0,76115	0,76424	0,76730	0,77035	0,77337	0,77637	0,77935	0,78230	0,78524
0,8	0,78814	0,79103	0,79389	0,79673	0,79955	0,80234	0,80511	0,80785	0,81057	0,81327
0,9	0,81594	0,81859	0,82121	0,82381	0,82639	0,82894	0,83147	0,83398	0,83646	0,83891
1,0	0,84134	0,84375	0,84614	0,84849	0,85083	0,85314	0,85543	0,85769	0,85993	0,86214
1,1	0,86433	0,86650	0,86864	0,87076	0,87286	0,87493	0,87698	0,87900	0,88100	0,88298
1,2	0,88493	0,88686	0,88877	0,89065	0,89251	0,89435	0,89617	0,89796	0,89973	0,90147
1,3	0,90320	0,90490	0,90658	0,90824	0,90988	0,91149	0,91309	0,91466	0,91621	0,91774
1,4	0,91924	0,92073	0,92220	0,92364	0,92507	0,92647	0,92785	0,92922	0,93056	0,93189
1,5	0,93319	0,93448	0,93574	0,93699	0,93822	0,93943	0,94062	0,94179	0,94295	0,94408
1,6	0,94520	0,94630	0,94738	0,94845	0,94950	0,95053	0,95154	0,95254	0,95352	0,95449
1,7	0,95543	0,95637	0,95728	0,95818	0,95907	0,95994	0,96080	0,96164	0,96246	0,96327
1,8	0,96407	0,96485	0,96562	0,96638	0,96712	0,96784	0,96856	0,96926	0,96995	0,97062
1,9	0,97128	0,97193	0,97257	0,97320	0,97381	0,97441	0,97500	0,97558	0,97615	0,97670
2,0	0,97725	0,97784	0,97831	0,97882	0,97932	0,97982	0,98030	0,98077	0,98124	0,98169
2,1	0,98214	0,98257	0,98300	0,98341	0,98382	0,98422	0,98461	0,98500	0,98537	0,98574
2,2	0,98610	0,98645	0,98679	0,98713	0,98745	0,98778	0,98809	0,98840	0,98870	0,98899
2,3	0,98928	0,98956	0,98983	0,99010	0,99036	0,99061	0,99086	0,99111	0,99134	0,99158
2,4	0,99180	0,99202	0,99224	0,99245	0,99266	0,99286	0,99305	0,99324	0,99343	0,99361
2,5	0,99379	0,99396	0,99413	0,99430	0,99446	0,99461	0,99477	0,99492	0,99506	0,99520
2,6	0,99534	0,99547	0,99560	0,99573	0,99585	0,99598	0,99609	0,99621	0,99632	0,99643
2,7	0,99653	0,99664	0,99674	0,99683	0,99693	0,99702	0,99711	0,99720	0,99728	0,99736
2,8	0,99744	0,99752	0,99760	0,99767	0,99774	0,99781	0,99788	0,99795	0,99801	0,99807
2,9	0,99813	0,99819	0,99825	0,99831	0,99836	0,99841	0,99846	0,99851	0,99856	0,99861
3,0	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99899	0,99893	0,99896	0,99900
3,1	0,99903	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929
3,2	0,99931	0,99934	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950
3,3	0,99952	0,99953	0,99955	0,99957	0,99958	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965
3,4	0,99966	0,99968	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976
3,5	0,99977	0,99978	0,99978	0,99979	0,99980	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99983
3,6	0,99984	0,99985	0,99985	0,99986	0,99986	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988	0,99989
3,7	0,99989	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992
3,8	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99995
3,9	0,99995	0,99995	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99997	0,99997



Como alternativa a la Tabla I.1 los valores de la Tabla I.2, presentan la parte del área total que hay a partir de la media, μ, hacia un lado de la curva. Por ejemplo, el área entre la media y un punto que está a 1,55 desviaciones estándar a su derecha es 0,43943.

TABLA I.2

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,00000	0,00399	0,00798	0,01197	0,01595	0,01994	0,02392	0,02790	0,03188	0,03586
0,1	0,03983	0,04380	0,04776	0,05172	0,05567	0,05962	0,06356	0,06749	0,07142	0,07535
0,2	0,07926	0,08317	0,08706	0,09095	0,09483	0,09871	0,10257	0,10642	0,11026	0,11409
0,3	0,11791	0,12172	0,12552	0,12930	0,13307	0,13683	0,14058	0,14431	0,14803	0,15173
0,4	0,15542	0,15910	0,16276	0,16640	0,17003	0,17364	0,17724	0,18082	0,18439	0,18793
0,5	0,19146	0,19497	0,19847	0,20194	0,20540	0,20884	0,21226	0,21566	0,21904	0,22240
0,6	0,22575	0,22907	0,23237	0,23565	0,23891	0,24215	0,24537	0,24857	0,25175	0,25490
0,7	0,25804	0,26115	0,26424	0,26730	0,27035	0,27337	0,27637	0,27935	0,28230	0,28524
0,8	0,28814	0,29103	0,29389	0,29673	0,29955	0,30234	0,30511	0,30785	0,31057	0,31327
0,9	0,31594	0,31859	0,32121	0,32381	0,32639	0,32894	0,33147	0,33398	0,33646	0,33891
1,0	0,34134	0,34375	0,34614	0,34850	0,35083	0,35314	0,35543	0,35769	0,35993	0,36214
1,1	0,36433	0,36650	0,36864	0,37076	0,37286	0,37493	0,37698	0,37900	0,38100	0,38298
1,2	0,38493	0,38686	0,38877	0,39065	0,39251	0,39435	0,39617	0,39796	0,39973	0,40147
1,3	0,40320	0,40490	0,40658	0,40824	0,40988	0,41149	0,41309	0,41466	0,41621	0,41174
1,4	0,41924	0,42073	0,42220	0,42364	0,42507	0,42647	0,42786	0,42922	0,43056	0,43189
1,5	0,43319	0,43448	0,43574	0,43699	0,43822	0,43943	0,44062	0,44179	0,44295	0,44408
1,6	0,44520	0,44630	0,44738	0,44845	0,44950	0,45053	0,45154	0,45254	0,45352	0,45449
1,7	0,45543	0,45637	0,45728	0,45818	0,45907	0,45994	0,46080	0,46164	0,46246	0,46327
1,8	0,46407	0,46485	0,46562	0,46638	0,46712	0,46784	0,46856	0,46926	0,46995	0,47062
1,9	0,47128	0,47193	0,47257	0,47320	0,47381	0,47441	0,47500	0,47558	0,47615	0,47670
2,0	0,47725	0,47778	0,47831	0,47882	0,47932	0,47982	0,48030	0,48077	0,48124	0,48169
2,1	0,48214	0,48257	0,48300	0,48341	0,48382	0,48422	0,48461	0,48500	0,48537	0,48574
2,2	0,48610	0,48645	0,48679	0,48713	0,48745	0,48778	0,48809	0,48840	0,48870	0,48899
2,3	0,48928	0,48956	0,48983	0,49010	0,49036	0,49061	0,49086	0,49111	0,49134	0,49158
2,4	0,49180	0,49202	0,49224	0,49245	0,49266	0,49286	0,49305	0,49324	0,49343	0,49361
2,5	0,49379	0,49396	0,49413	0,49430	0,49446	0,49461	0,49477	0,49492	0,49506	0,49520
2,6	0,49534	0,49547	0,49560	0,49573	0,49585	0,49598	0,49609	0,49621	0,49632	0,49643
2,7	0,49653	0,49664	0,49674	0,49683	0,49693	0,49702	0,49711	0,49720	0,49728	0,49736
2,8	0,49744	0,49752	0,49760	0,49767	0,49774	0,49781	0,49788	0,49795	0,49801	0,49807
2,9	0,49813	0,49819	0,49825	0,49831	0,49836	0,49841	0,49846	0,49851	0,49856	0,49861
3,0	0,49865	0,49869	0,49874	0,49878	0,49882	0,49886	0,49889	0,49893	0,49897	0,49900
3,1	0,49903	0,49906	0,49910	0,49913	0,49916	0,49918	0,49921	0,49924	0,49926	0,49929

APÉNDICE II VALORES DE $e^{-\lambda}$ PARA SU UTILIZACIÓN EN LA DISTRIBUCIÓN DE POISSON

Valores de $e^{-\lambda}$

λ	$e^{-\lambda}$	λ	$e^{-\lambda}$	λ	$e^{-\lambda}$	λ	$e^{-\lambda}$
0,0	1,0000	1,6	0,2019	3,1	0,0450	4,6	0,0101
0,1	0,9048	1,7	0,1827	3,2	0,0408	4,7	0,0091
0,2	0,8187	1,8	0,1653	3,3	0,0369	4,8	0,0082
0,3	0,7408	1,9	0,1496	3,4	0,0334	4,9	0,0074
0,4	0,6703	2,0	0,1353	3,5	0,0302	5,0	0,0067
0,5	0,6065	2,1	0,1225	3,6	0,0273	5,1	0,0061
0,6	0,5488	2,2	0,1108	3,7	0,0247	5,2	0,0055
0,7	0,4966	2,3	0,1003	3,8	0,0224	5,3	0,0050
0,8	0,4493	2,4	0,0907	3,9	0,0202	5,4	0,0045
0,9	0,4066	2,5	0,0821	4,0	0,0183	5,5	0,0041
1,0	0,3679	2,6	0,0743	4,1	0,0166	5,6	0,0037
1,1	0,3329	2,7	0,0672	4,2	0,0150	5,7	0,0033
1,2	0,3012	2,8	0,0608	4,3	0,0136	5,8	0,0030
1,3	0,2725	2,9	0,0550	4,4	0,0123	5,9	0,0027
1,4	0,2466	3,0	0,0498	4,5	0,0111	6,0	0,0025
1,5	0,2231						

APÉNDICE III TABLA DE NÚMEROS ALEATORIOS

52	06	50	88	53	30	10	47	99	37	66	91	35	32	00	84	57	07
37	63	28	02	74	35	24	03	29	60	74	85	90	73	59	55	17	60
82	57	68	28	05	94	03	11	27	79	90	87	92	41	09	25	36	77
69	02	36	49	71	99	32	10	75	21	95	90	94	38	97	71	72	49
98	94	90	36	06	78	23	67	89	85	29	21	25	73	69	34	85	76
96	52	62	87	49	56	59	23	78	71	72	90	57	01	98	57	31	95
33	69	27	21	11	60	95	89	68	48	17	89	34	09	93	50	44	51
50	33	50	95	13	44	34	62	64	39	55	29	30	64	49	44	30	16
88	32	18	50	62	57	34	56	62	31	15	40	90	34	51	95	26	14
90	30	36	24	69	82	51	74	30	35	36	85	01	55	92	64	09	85
50	48	61	18	85	23	08	54	17	12	80	69	24	84	92	16	49	59
27	88	21	62	69	64	48	31	12	73	02	68	00	16	16	46	13	85
45	14	46	32	13	49	66	62	74	41	86	98	92	98	84	54	33	40
81	02	01	78	82	74	97	37	45	31	94	99	42	49	27	64	89	42
66	83	14	74	27	76	03	33	11	97	59	81	72	00	64	61	13	52
74	05	81	82	93	09	96	33	52	78	13	06	28	30	94	23	37	39
30	34	87	01	74	11	46	82	59	94	25	34	32	23	17	01	58	73
59	55	72	33	62	13	74	68	22	44	42	09	32	46	71	79	45	89
67	09	80	98	99	25	77	50	03	32	36	63	65	75	94	19	95	88
60	77	46	63	71	69	44	22	03	85	14	48	69	13	30	50	33	24
60	08	19	29	36	72	30	27	50	64	85	72	75	29	87	05	75	01
80	45	86	99	02	34	87	08	86	84	49	76	24	08	01	86	29	11
53	84	49	63	26	65	72	84	85	63	26	02	75	26	92	62	40	67
69	84	12	94	51	36	17	02	15	29	16	52	56	43	26	22	08	62
37	77	13	10	02	18	31	19	32	85	31	94	81	43	31	58	33	51

Fuente: Extraído de *A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates*, The Free Press (1955): 7, con permiso de Rand Corporation.

APÉNDICE IV CÓMO UTILIZAR EXCEL OM Y POM PARA WINDOWS

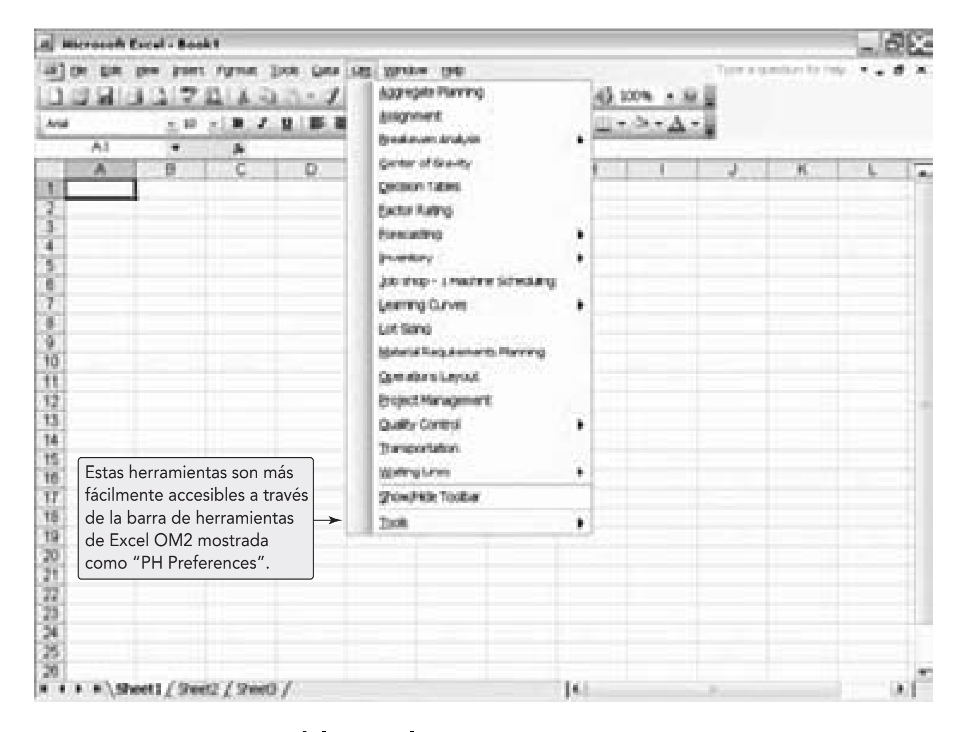
Con este texto están disponibles dos enfoques para la toma de decisiones ayudada por computadora: **Excel OM** (*Operations Management*) y **POM** (*Production and Operations Management*) **para Windows**. Se trata de los dos paquetes de software existentes más fáciles de utilizar por los usuarios, para ayudarle a aprender y entender la dirección de operaciones. Ambos programas pueden usarse tanto para resolver los problemas identificados con un logotipo (**P, x, Px)** al final de los capítulos, como para comprobar las respuestas que se hayan realizado manualmente. Ambos paquetes de software se sirven de la interfaz estándar Windows y funcionan en cualquier computadora IBM-compatible 486 o superior, con al menos 4 MB de RAM, y sistema operativo Windows 95 o superior.

EXCEL OM

Excel OM ha sido también diseñado para ayudarnos a aprender y a comprender tanto la dirección de operaciones como Excel. Aun cuando el software contiene 17 módulos y más de 35 submódulos, las pantallas para cada módulo son uniformes y fáciles de usar. Los módulos se muestran en el Programa IV.1. Este software está en el CD-ROM que se incluye al final de este texto, y es gratuito para los compradores de este libro. Para su utilización, necesita tener instalado Excel 97 o superior en su computadora.

Para instalar *Excel OM*:

1. Introduzca el CD-ROM.
2. Abra Mi PC desde el escritorio y pulse dos veces sobre el icono del CD.



PROGRAMA IV.1 ■ Módulos Excel OM

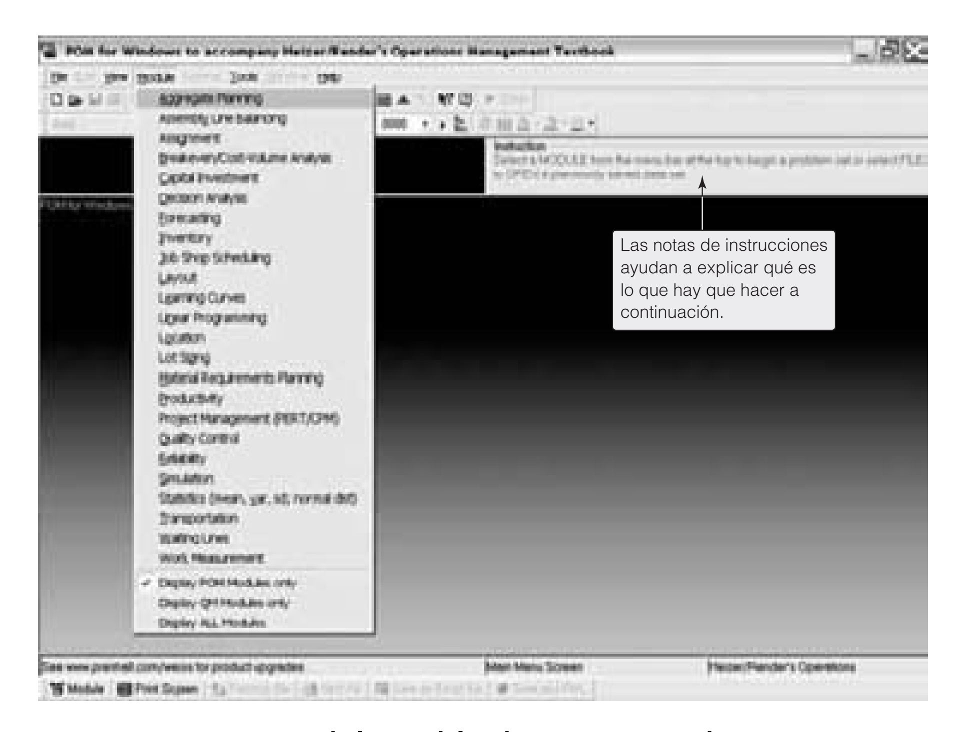
3. Abra la carpeta ExcelOM2.
4. Abra el programa ExcelOM2.Heizer.
5. Siga las instrucciones de instalación que aparecen en la pantalla.

En el programa de instalación se han asignado valores por defecto, pero pueden cambiarse si así lo desea. La carpeta por defecto en la que se instalará el programa recibe el nombre de C:\ExcelOM2 y el nombre por defecto del grupo de programas situado en el menú INICIO es Excel OM 2. Como regla general, lo único necesario es hacer clic en NEXT cada vez que la instalación nos haga una pregunta.

Iniciar del programa Si todavía no tenemos abierto Excel, entonces para arrancar Excel OM se efectuará un doble clic en el acceso directo Excel OM 2 creado en el escritorio durante la instalación. Otra opción consiste en hacer clic en INICIO, PROGRAMAS, EXCEL OM 2. Si ya tenemos abierto Excel, entonces basta con cargar el archivo ExcelOM2.xla, que se encuentra en el directorio C:\ExcelOM2, siempre que no haya cambiado este directorio durante la instalación del paquete.

También es posible instalar Excel OM como un complemento (*add-in*) de Excel que se carga cada vez que se abre Excel. Para ello, basta con ir a HERRAMIENTAS (TOOLS), ADD-INS, EXAMINAR (BROWSE) y seleccionar Excel OM2.xla de la carpeta C:\ExcelOM2. La desinstalación de los complementos (*add-ins*) en Excel resulta más difícil que su instalación, de tal forma que no se recomienda este método a menos que siempre que abramos Excel sea para resolver problemas de dirección de operaciones.

Excel OM cumple dos objetivos en el proceso de aprendizaje. En primer lugar, puede sencillamente ayudarle a resolver los problemas. Introducimos los datos adecuados y el programa facilita soluciones numéricas. POM para Windows funciona bajo el mismo principio, como veremos. Sin embargo, Excel OM permite un segundo enfoque; es el siguiente: anotar las *fór-*



PROGRAMA IV.2 ■ Lista de los módulos de POM para Windows

Exponential Smoothing

Error analysis begins at first period with forecast

Details and Error Analysis

Port of New Orleans Solution Solution

	Demand(y)	Forecast	Error	|Error|	Error^2	|Pct Error|
Quarter 1	180	175	5	5	25	.0278
Quarter 2	168	175.5	-7.5	7.5	56.25	.0446
Quarter 3	159	174.75	-15.75	15.75	248.0625	.0991
Quarter 4	175	173.175	1.825	1.825	3.3306	.0104
Quarter 5	190	173.3575	16.6425	16.6425	276.9729	.0876
Quarter 6	205	175.0217	29.9783	29.9783	898.6969	.1462
Quarter 7	180	178.0196	1.9804	1.9804	3.9221	.011
Quarter 8	182	178.2176	3.7824	3.7824	14.3064	.0208
TOTALS	1439		35.9696	80.4696	1526.54	.4475
AVERAGE	179.875		4.4948	10.3073	190.8176	.0559
Next period forecast		178.5959	(Bias)	(MAD)	(MSE)	(MAPE)
				Std err	15.9507	

PROGRAMA IV.3 ■ Ejemplo previsiones en POM para Windows utilizando los datos del Capítulo 4 del volumen *Decisiones Estratégicas*

mulas Excel utilizadas para encontrar las soluciones y modificarlas para poder tratar una mayor variedad de problemas. Este enfoque "abierto" le permite observar, comprender e incluso cambiar las fórmulas en las que se basan los cálculos Excel, con la esperanza de transmitir el potencial de Excel como una herramienta de análisis en la dirección de operaciones.

POM para Windows

POM para Windows es un software de ayuda a la toma de decisiones que también se ofrece gratis en el CD del estudiante. El Programa IV.2 muestra la lista de los 24 programas OM que hay en el CD y que se instalarán en el disco duro de su computadora. Una vez que se siguen las instrucciones estándar de instalación, se añadirá un icono del programa POM para Windows al menú INICIO y en el escritorio. Se puede acceder al programa haciendo doble clic en el icono. Existen versiones actualizadas de POM para Windows, en Internet, en la biblioteca de descargas Prentice Hall, que se encuentra en **http://prenhall.com/weiss**.

Para ilustrar la facilidad de uso de POM para Windows, incluimos los Programas IV.3 a IV.6. El Programa IV.3 muestra un aspecto del módulo de previsiones, el alisado exponencial, tal

Method: Longest operation time

Cycle time computation: Given / Computed — 40 units per 8 — seconds / minutes / hours

Task time unit: minutes

Instruction

Example

TASK	Minutes	Predecessor 1	Predecessor 2	Predecessor 3	Predecessor 4	Predecessor 5	Predecessor 6
A	10						
B	11	a					
C	5	b					
D	4	b					
E	12	a					
F	3	c	d				
G	7	f					
H	11	e					
I	3	g	h				

Se dispone de cinco heurísticas.

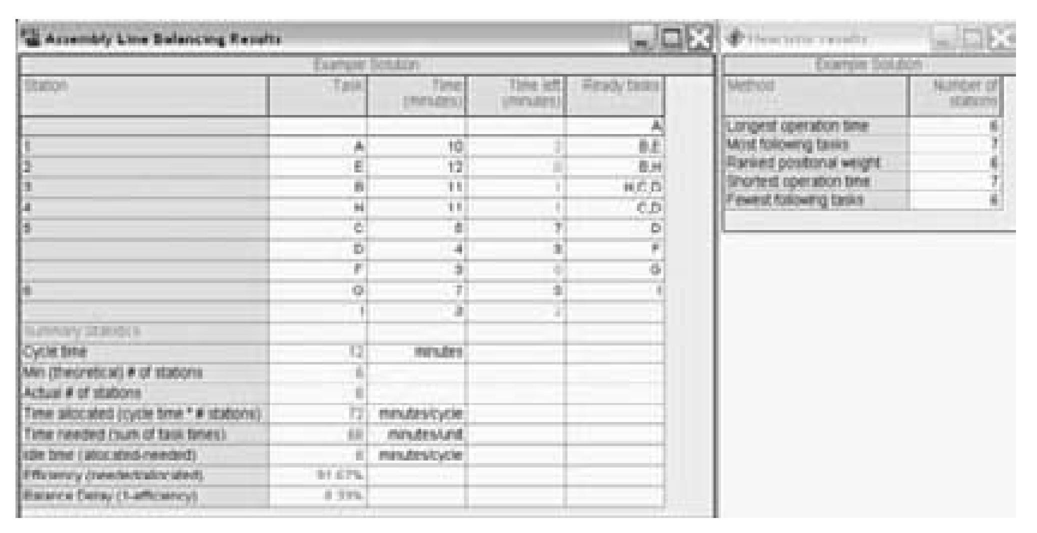
Introduzca sólo el (los) predecesores inmediato(s).

PROGRAMA IV.4 ■ Módulo de equilibrado de líneas de montaje de POM para Windows, utilizando datos del Capítulo 9 del volumen *Decisiones Estratégicas*

como se aplica a los datos relativos al Puerto de Nueva Orleans del Capítulo 4 del volumen *Decisiones Estratégicas*.

Los Programas IV.4 y IV.5 ilustran el proceso del Equilibrado de Líneas de Montaje, utilizando datos del Capítulo 9 del volumen *Decisiones Estratégicas*. La primera pantalla, IV.4, muestra los datos de entrada, mientras que la IV.5 presenta los resultados del equilibrado.

Finalmente, el Programa IV.6 es un ejemplo del módulo de programación de talleres de POM para Windows. Se sirve de datos del Capítulo 5 del volumen de *Decisiones tácticas*. Comprobará que todos los módulos de este potente programa son muy fáciles de usar. Basta con seguir las instrucciones que aparecen en la parte superior de cada pantalla.



Assembly Line Balancing Results

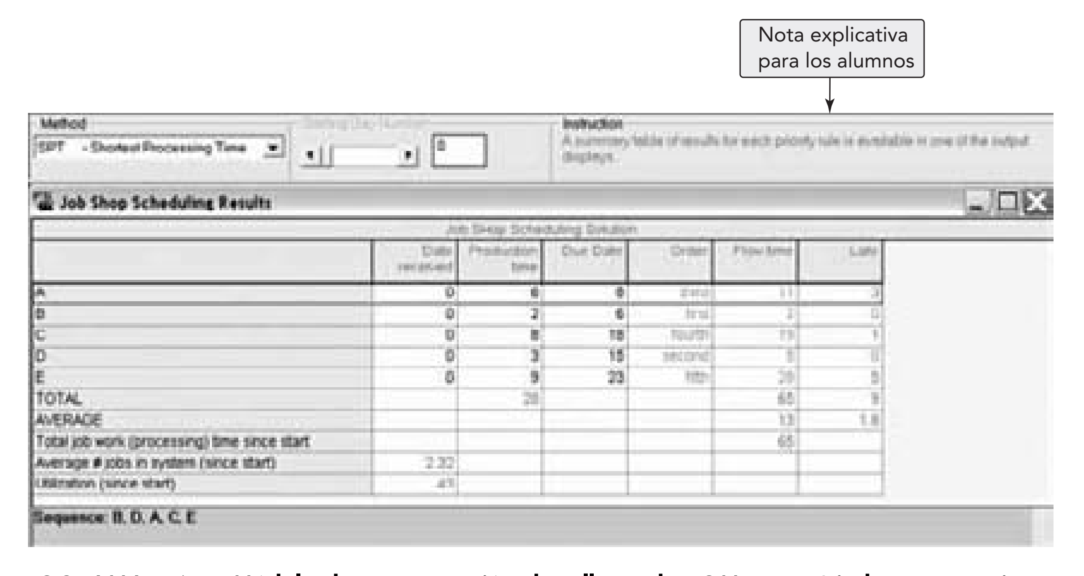
Example Solution

Station	Task	Time (minutes)	Time left (minutes)	Ready tasks
				A
1	A	10	2	B,E
2	E	12	0	B,H
3	B	11	1	H,C,D
4	H	11	1	C,D
5	C	5	7	D
	D	4	3	F
	F	3	0	G
6	G	7	5	I
	I	3	2	
Summary Statistics				
Cycle time	12	minutes		
Min (theoretical) # of stations	6			
Actual # of stations	6			
Time allocated (cycle time * # stations)	72	minutes/cycle		
Time needed (sum of task times)	66	minutes/unit		
Idle time (allocated-needed)	6	minutes/cycle		
Efficiency (needed/allocated)	91.67%			
Balance Delay (1-efficiency)	8.33%			

Example Solution

Method	Number of stations
Longest operation time	6
Most following tasks	7
Ranked positional weight	6
Shortest operation time	7
Fewest following tasks	6

PROGRAMA IV.5 ■ Pantalla de resultados del ejemplo anterior de equilibrado de líneas, Programa IV.4 de POM para Windows



Method: SPT - Shortest Processing Time

Instruction: A summary table of results for each priority rule is available in one of the output displays.

Job Shop Scheduling Results

Job Shop Scheduling Solution

	Date received	Production time	Due Date	Order	Flow time	Late
A	0	6	8	third	11	3
B	0	2	6	first	2	0
C	0	8	18	fourth	19	1
D	0	3	15	second	5	0
E	0	9	23	fifth	28	5
TOTAL		28			65	9
AVERAGE					13	1.8
Total job work (processing) time since start					65	
Average # jobs in system (since start)	2.32					
Utilization (since start)	43					

Sequence: B, D, A, C, E

PROGRAMA V.6 ■ Módulo de programación de talleres de POM para Windows, a partir de datos del Capítulo 5 del volumen *Decisiones Tácticas*

APÉNDICE V SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE NÚMERO PAR

Capítulo 1

1.2 Donna Inc., 8.2; Kay Inc., 9,8
1.4 Respuestas personales. Los problemas pueden incluir: profesores, localización, ayuda financiera, tamaño, instalaciones, etc.
1.6 **(a)** 3,13$
(b) 7,69$
1.8 **(a)** La opción a es la más económica.
(b) Las necesidades del cliente pueden exigir una programación más rápida.
1.10 **(a)** Más deprisa que un subcontratista.
(b) La producción o prueba interna puede exigir una programación más rápida.

Suplemento al Capítulo 1

S1.2 **www.geis.com** ofrece Global Exchange Services, que permiten a las PYMES aprovechar las ventajas del comercio electrónico.
S1.4 **www.ariba.com** ofrece subastas en la red para componentes industriales, materias primas, productos básicos y servicios.
S1.6 Cualquier avance hacia los "mercados perfectos" debería presionar los precios a la baja.

Capítulo 2

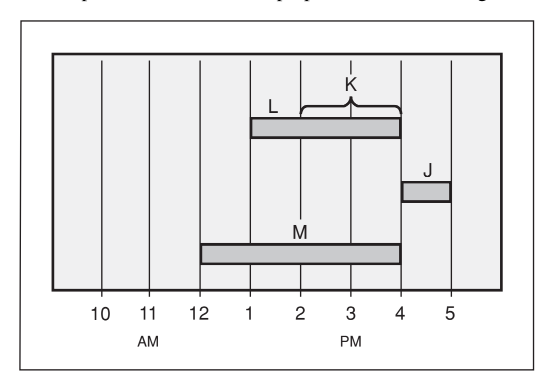
2.2 Los artículos A son G2 y F3; los artículos B son A2, C7 y D1; el resto son C.
2.4 108 artículos
2.6 600 unidades
2.8 **(a)** 80 unidades
(b) 73 unidades
2.10 2.100 unidades
2.12 **(a)** 149 válvulas
(b) 74,5 válvulas
(c) 27 pedidos
(d) $9\frac{1}{4}$ días
(e) 1.341,64$
(f) 80 válvulas
2.14 **(a)** Las variaciones en la cantidad de pedido tienen un limitado impacto en el coste total.
(b) EOQ = 50
2.16 2.309 unidades
2.18 **(a)** 1.217 unidades
(b) 1.095 = inventario máximo
(c) 8,22 tandas de producción
(d) 657,30$
2.20 51.000$ sin descuento
49.912,50$ con descuento
2.22 Hacer pedidos de 100 unidades; Coste total = 752,63$
2.24 **(a)** EOQ = 410
(b) El proveedor Allen tiene un coste ligeramente inferior.
(c) La cantidad óptima de pedido = 1.000 unidades a un coste total de 128.920$
2.26 **(a)** EOQ (A) = 336; EOQ (B) = 335
(b) Hacer un pedido de 1.200 al proveedor B.
(c) A 1.200 libras, coste total = 161.275$
(d) El espacio de almacenamiento y la caducidad.
2.28 **(a)** Z = 1,88
(b) Stock de seguridad = $Z\sigma$ = 1,88(5) = 9,4 lectores
(c) Punto de pedido = 59,4 lectores
2.30 150 libros
2.32 **(a)** 2.290 toallas
(b) 290 toallas
2.34 PP = 1.718 puros
2.36 EOQ = 442
2.38 **(a)** Q = 400 libras
(b) 600$
(c) 600$
(d) PP = 369,99
(e) 69,99
(f) 209,37$
(g) Stock de seguridad = 61,61

Capítulo 3

3.2 Coste = 53.320$
No, el plan 2 es mejor.
3.4 Coste = 214.000$ para el plan B
3.6 Plan D, 122.000$; plan E cuesta 129.000$
3.8 Cada respuesta que desarrolle será diferente.
3.10 Plan C, 92.000$; plan D, 82.300$, suponiendo un inventario inicial = 0
3.12 **(a)** Coste de 314.000$.
(b) Coste de 329.000$ (pero un enfoque alternativo da 259.000$).
(c) Coste de 222.000$.
(d) Plan C.
(e) Plan C, con el menor coste y empleo estable.
3.14 1.186.810$
3.16 100.750$
3.18 90.850$
3.20 **(a, b)** Coste utilizando horas extras y a Abernathy = 198.125$.
(c) Debería elaborarse un caso de estudio para las dos posibilidades (continuar como hasta ahora o añadir un nuevo contable).
3.22 Modelo actual = 9.200$ en ventas; el modelo propuesto da 9.350$, que sólo es ligeramente mejor.

Capítulo 4

4.2 El plan situado en el tiempo para las bolsas de regalo es:



Alguien debería empezar el artículo M a mediodía.

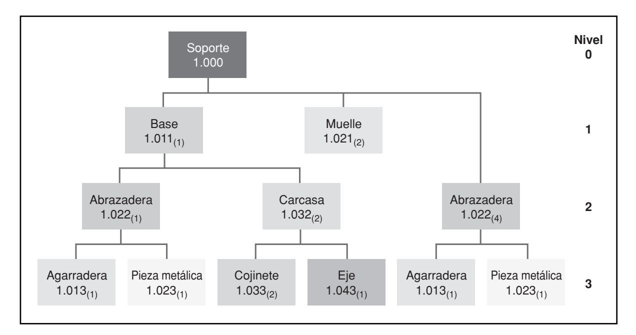
4.4 Plan de las necesidades brutas de materiales:

Art.		Semana 1	2	3	4	5	6	7	8	Plazo fab./apr. (sems.)
S	Nec. brutas							100		
	Lanz. de orden					100				2
T	Nec. brutas					100				
	Lanz. de orden				100					1
U	Nec. brutas					200				
	Lanz. de orden			200						2
V	Nec. brutas				100					
	Lanz. de orden		100							2
W	Nec. brutas				200					
	Lanz. de orden	200								3
X	Nec. brutas				100					
	Lanz. de orden			100						1
Y	Nec. brutas			400						
	Lanz. de orden	400								2
Z	Nec. brutas			600						
	Lanz. de orden		600							1

4.6 Plan de necesidades:

Art.		Semana 1	2	3	4	5	6	7	8	Plazo fab./apr. (sems.)
S	Nec. brutas							100		
	Lanz. de orden					100				2
T	Nec. brutas					100				
	Lanz. de orden				100					1
U	Nec. brutas					200	20			
	Lanz. de orden			200	20					2
V	Nec. brutas				100					
	Lanz. de orden		100							2
W	Nec. brutas				200					
	Lanz. de orden	200								3
X	Nec. brutas				100					
	OLanz. de orden			100						1
Y	Nec. brutas			400	40					
	Lanz. de orden	400	40							2
Z	Nec. brutas			600	60					
	Lanz. de orden		600	60						1

4.8 **(a)**



(b) Para 50 soportes, las necesidades brutas son 50 bases, 100 muelles, 250 abrazaderas, 250 agarraderas, 250 piezas metálicas, 100 carcasas, 200 cojinetes y 100 ejes.

(c) Para 50 soportes, las necesidades netas son 25 bases, 100 muelles, 125 abrazaderas, 125 agarraderas, 125 piezas metálicas, 50 carcasas, 100 cojinetes y 50 ejes.

4.10 **(a)** Plan de las necesidades brutas de materiales de los tres primeros artículos:

Art.		Semana 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X1	Necesidades brutas					50		20		100			
	Lanzamiento de la orden				50		20		100				
B1	Necesidades brutas				50		20		100				
	Lanzamiento de la orden		50		20		100						
B2	Necesidades brutas				100		40		200				
	Lanzamiento de la orden		100		40		200						

4.10 **(b)** Plan de las necesidades netas de materiales de los dos primeros artículos:

Nivel: 0 Artículo: X1	Padre: Plazo de fab./apr:	Cantidad: Tamaño del lote: L4L									
Semana n.º	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**

Semana n.º	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Necesidades brutas								50		20		100
Recepciones programadas												
Inventario disponible								50		0		0
Necesidades netas								0		20		100
Recepciones de órdenes planificadas										20		100
Lanzamiento de órdenes planificadas									20		100	

Nivel: 1 — Padre: X1 — Cantidad: 1X
Artículo: B1 — Plazo de fab./apr: 2 — Tamaño del lote: L4L

Semana n.º	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Necesidades brutas									20		100	
Recepciones programadas												
Inventario disponible									20		0	
Necesidades netas									0		100	
Recepciones de órdenes planificadas											100	
Lanzamiento de órdenes planificadas									100			

14.12 Plan de necesidades netas de materiales (sólo se presentan los artículos A y H):

	Semana											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Necesidades brutas						100			50			150
Recepciones programadas						0			0			0
Disponible						100			50			150
Necesidades netas						100			50			150
Lanzamiento de órdenes					100			50		150		
H Necesidades brutas								100		50		
Disponible								0		0		
Necesidades netas								100		50		
Recepciones de órdenes								100		50		
Lanzamiento de órdenes						100			50			

14.14 **(a)**

Nivel	Descripción	Cdad.
0	A	1
1	B	1
2	C	1
2	D	1
3	E	1
1	F	1
2	G	1
2	H	1
3	E	1
3	C	1

(b) Solución para los artículos A, B, F:

Tamaño del lote	Plazo de fab./apr	Dispo-nible	Stock de seguridad	Reser-vado	Código de nivel inferior	Ident. del artíc.	Periodo (semana)	1	2	3	4	5	6	7	8
Lote	1	0	—	—	0	A	Necesidades brutas								10
a							Recepciones programadas								
Lote							Disponible previsto								0
							Necesidades netas								10
							Recepciones de órdenes planificadas								10
							Lanzamientos planificados							10	
Lote	1	2	—	—	1	B	Necesidades brutas							10[A]	
a							Recepciones programadas								
Lote							Disponible previsto	2	2	2	2	2	2	2	0
							Necesidades netas							8	
							Recepciones planificadas							8	
							Lanzamientos planificados						8		
Lote	1	5	—	—	1	F	Necesidades brutas							10[A]	
a							Recepciones programadas								
Lote							Disponible previsto	5	5	5	5	5	5	5	0
							Necesidades netas							5	
							Recepciones planificadas							5	
							Lanzamientos planificados						5		

4.16 **(a)** Sólo cambia el artículo G.
(b) El componente F y 4 unidades de A se retrasarán de la semana 6 a la 7.
(c) Entre otras opciones: retrasar 4 unidades de A una semana; pedir al proveedor de G que acelere el aprovisionamiento.

4.18 EOQ = 57; Coste total = 1.630$

4.20 650$

4.22 455$

4.24 Solución para las 5 primeras semanas (de las 10 pedidas):

Semana	Unidades	Capacidad requerida (minutos)	Capacidad disponible (minutos)	Por encima/ por debajo	Medidas a tomar por el planificador de la producción
1	60	3.900	2.250	1.650	División del lote: mover 300 minutos (4,3 unidades) a la 2.ª semana, y 1.350 a la 3.ª semana.
2	30	1.950	2.250	(300)	
3	10	650	2.250	(1.600)	
4	40	2.600	2.250	350	División del lote: mover 250 minutos a la 3.ª semana. División de la operación. Mover 100 minutos a otra máquina, a horas extras o a subcontratar.
5	70	4.550	2.250	2.300	División del lote: mover 1.600 minutos a la 6.ª semana. Solapar operaciones para sacar fuera el producto. División de operaciones. Mover 700 minutos a otra máquina, a horas extras o a subcontratar.

4.26 He aquí los lanzamientos de órdenes para la mesa y para la parte superior:

Tamaño del pedido	Plazo fab./apr. (n.º de periodos)	Disponible	Stock de seg.	Reservado	Código de bajo nivel	ID del artículo		Periodo (día)							
								1	2	3	4	5	6	7	8
Lote a lote	1	—	—	—	0	Tabla	Necesidades brutas					640	640	128	128
							Recepciones programadas								
							Disponible previsto								
							Necesidades netas					640	640	128	128
							Recep. de órdenes planificadas					640	640	128	128
							Lanz. de órdenes planificadas				640	640	128	128	
Lote a lote	1	—	—	—	1	Parte sup.	Necesidades brutas				640	640	128	128	
							Recepciones programadas								
							Disponible previsto								
							Necesidades netas				640	640	128	128	
							Recep. de órdenes planificadas				640	640	128	128	
							Lanz. de órdenes planificadas			640	640	128	128		

Capítulo 5

5.2

Tra-bajo	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
D									
E									
F									
G									

Ahora

5.4 **(a)** 1-D, 2-A, 3-C, 4-B
(b) 40

5.6 A-61 a 4; A-60 a 1; A-53 a 3; A-56 a 5; A-52 a 2; A-59 a 6; 150 horas.

5.8 1-2 p.m. en A; 2-3 p.m. en C; 3-4 p.m. en B; 4-5 p.m. en Independiente; exposición 75,5

5.10 **(a)** A, B, C, D, E
(b) B, A, D, E, C
(c) E, D, A, B, C
(d) C, B, A, D, E
El SPT es el mejor.

5.12 **(a)** A, B, C, D
(b) B, C, A, D
(c) D, A, C, B
(d) C, B, D, A
(e) D, C, A, B
El SPT es la mejor en todas las medidas.

5.14 **(a)** A, B, C, D, E
(b) C, A, B, E, D
(c) C, D, E, A, B
(d) B, A, E, D, C
EDD, y luego FCFS son las mejores para el retraso; SPT para las otras dos medidas.

5.16 1, 3, 4, 2, 5

5.18 E, D, C, A, B, F

Capítulo 6

6.2 3.75, o 4 kanbans

6.4 Tamaño del kanban = 66; número de kanbans = 5,9 o 6

6.6 **(a)** EOQ = 10 bombillas
(b) 200 órdenes/año
(c) 200$

6.8 7,26 min

6.10 **(a)** Coste de preparación = 5,74$
(b) Tiempo de preparación 8,61 min.

Capítulo 7

7.2 Según la Figura 7.2, aproximadamente un 13% de fiabilidad total.

7.4 Averías diarias esperadas = 2,0
Coste esperado = 100$ diarios

7.6 **(a)** 5,0%
(b) 0,00001026 averías/unidad-hora.
(c) 0,08985
(d) 98,83

7.8 R_s = 0,8145

7.10 R_p = 0,99925

7.12 **(a)** R_p = 0,984
(b) Aumento del 11,1%.

7.14 R = 0,7918

7.16 **(a)** 0,972
(b) 0,981

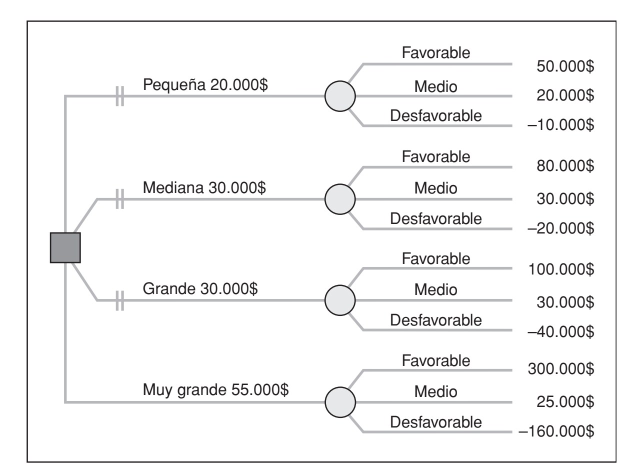
7.18 El sistema B es ligeramente superior, en 0,9397.

Módulo cuantitativo A

A.2 **(a)**

Tamaño de la primera estación	Mercado favorable ($)	Mercado medio ($)	Mercado desfavorable ($)	EV bajo equi-probabilidad
Pequeña	50.000	20.000	−10.000	20.000
Mediana	80.000	30.000	−20.000	30.000
Grande	100.000	30.000	−40.000	30.000
Muy grande	300.000	25.000	−160.000	55.000

(b) Maximax: Construir una gasolinera grande.
(c) Maximin: Construir una gasolinera pequeña.
(d) Equiprobabilidad: Construir una gasolinera muy grande.
(e)



A.4 EVPI = 13.800$ − 12.200 = 1.600$
donde 13.800$ = 0,3(22.000) + 0,5(12.000) + 0,2(6.000)

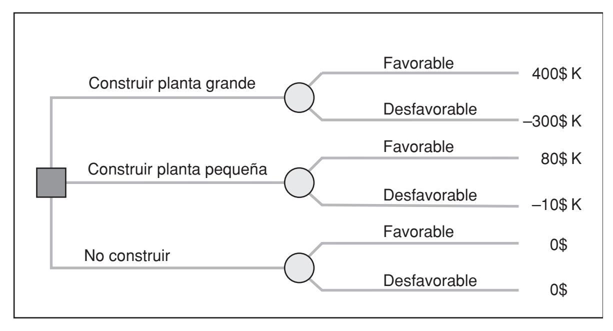
A.6 EVPI = 364.000$ − 320,00 = 44.000$

A.8 E (coste dedicación completa) = 520$
E (coste tiempo parcial) = 475$

A.10 Gran ampliación; EMV = 150.000$

A.12 8 cajas; EMV = 352,50$

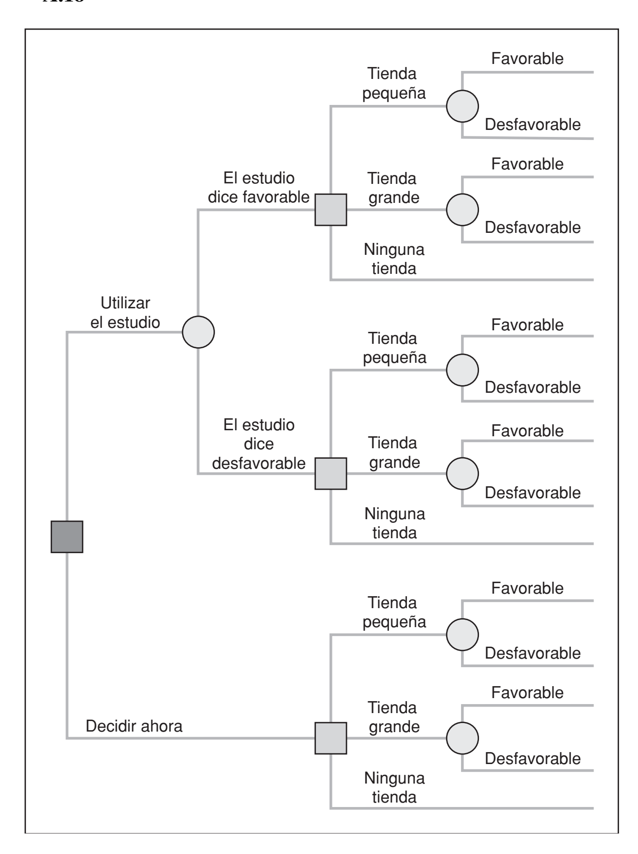
A.14 **(a)**



(b) Planta pequeña con EMV = 26.000$
(c) EVPI = 134.000$

A.16 **(a)** Max EMV = 11.700$
(b) EVPI = 13.200$ − 11.700$ = 1.500$

A.18



A.20 No reunir información y construirla grande; 4.500$.

A.22 **(b)** EMV(Y) = 4,2, que es la mejor

Módulo cuantitativo B

B.2 Beneficio = 100$ en $X = 0$, $Y = 10$
B.4 **(b)** Sí; B = 3,000$ en (75, 75) y (50, 150)
B.6 **(a)** Min $X_1 + 2X_2$
$X_1 + X_2 \geq 40$
$2X_1 + 4X_2 \geq 60$
$x_1 \leq 15$
(b) Coste = 0,65$ en (15, 25)
(c) 65¢
B.8 $x_1 = 200$, $x_2 = 0$, beneficio = 18.000$
B.10 10 Alfa 4, 24 Beta 5, beneficio = 55.200$
B.12 **(a)** $x_1 = 25{,}71$, $x_2 = 21{,}43$
(b) Coste = 68,57$
B.14 **(a)** $x_1 = 7{,}95$, $x_2 = 5{,}95$, $x_3 = 12{,}6$, B = 143,76$
(b) No queda tiempo sin utilizar.
(c) 26¢
(d) 7,86$
B.16 Sea X_{ij} = número de estudiantes que van en autobús del sector i al sector j.
Objetivo: minimizar las millas totales recorridas =

$$\begin{aligned} &5X_{AB} + 8X_{AC} + 6X_{AE} \\ &+ 0X_{BB} + 4X_{BC} + 12X_{BE} \\ &+ 4X_{CB} + 0X_{CC} + 7X_{CE} \\ &+ 7X_{DB} + 2X_{DC} + 5X_{DE} \\ &+12X_{EB} + 7X_{EC} + 0X_{EE} \end{aligned}$$

Sujeto a:
$X_{AB} + X_{AC} + X_{AE} = 700$ (número de estudiantes en el sector A)
$X_{BB} + X_{BC} + X_{BE} = 500$ (número de estudiantes en el sector B)
$X_{CB} + X_{CC} + X_{CE} = 100$ (número de estudiantes en el sector C)
$X_{DB} + X_{DC} + X_{DE} = 800$ (número de estudiantes en el sector D)
$X_{EB} + X_{EC} + X_{EE} = 400$ (número de estudiantes en el sector E)
$X_{AB} + X_{BB} + X_{CB} + X_{DB} + X_{EB} \leq 900$ (capacidad del colegio B)
$X_{AC} + X_{BC} + X_{CC} + X_{DC} + X_{EC} \leq 900$ (capacidad del colegio C)
$X_{AE} + X_{BE} + X_{CE} + X_{DE} + X_{EE} \leq 900$ (capacidad del colegio E)
Solución: $X_{AB} = 400$
$X_{AE} = 300$
$X_{BB} = 500$
$X_{CC} = 100$
$X_{DC} = 800$
$X_{EE} = 400$
Distancia = 5.400 "millas estudiantiles"
B.18 Contratar a 30 trabajadores; tres soluciones son posibles; dos de éstas son:
16 empiezan a las 7 a.m.
9 empiezan a las 3 p.m.
2 empiezan a las 7 p.m.
3 empiezan a las 11 p.m.
Otro óptimo alternativo es:
3 empiezan a las 3 a.m.

9 empiezan a las 7 a.m.
7 empiezan a las 11 a.m.
2 empiezan a las 3 p.m.
9 empiezan a las 7 p.m.
0 empiezan a las 11 p.m.

B.20 Max $P = 9x_1 + 12x_2$
Sujeto a:
$x_1 + x_2 \leq 10$
$x_1 + 2x_2 \leq 12$
$x_1 = 8$, $x_2 = 2$; beneficio = 96$

B.22 $x_1 = 14$, $x_2 = 33$, coste = 221

B.24 **(a)** 22,50$–30,00$
(b) Precio sombra del cableado = 5,00$ entre 210-280 horas

B.26 **(a)** Minimizar = $6X_{1A} + 5X_{1B} + 3X_{1C} + 8X_{2A} + 10X_{2B} + 8X_{2C} + 11X_{3A} + 14X_{3B} + 18X_{3C}$
Sujeto a:
$X_{1A} + X_{2A} + X_{3A} = 7$
$X_{1B} + X_{2B} + X_{3B} = 12$
$X_{1C} + X_{2C} + X_{3C} = 5$
$X_{1A} + X_{1B} + X_{1C} \leq 6$
$X_{2A} + X_{2B} + X_{2C} \leq 8$
$X_{3A} + X_{3B} + X_{3C} \leq 10$
(b) Coste mínimo = 219.000$

B.28 Un estudio da como resultado 2.791 pacientes médicos y 2.105 pacientes quirúrgicos, con unos ingresos de 9.551.659$ al año (que pueden variar ligeramente al redondear). Esto supone poner 61 camas médicas y 29 quirúrgicas

B.30 **(a)** Minimizar el coste total = $0{,}60X_1\$ + 2{,}35X_2 + 1{,}15X_3 + 2{,}25X_4 + 0{,}58X_5 + 1{,}17X_6 + 0{,}33X_7$ sujeto a:

$295X_1 + 1.216X_2 + 394X_3 + 358X_4 + 128X_5 + 118X_6 + 279X_7 \leq 1.500$
$295X_1 + 1.216X_2 + 394X_3 + 358X_4 + 128X_5 + 118X_6 + 279X_7 \geq 900$
$0{,}2X_1 + 0{,}2X_2 + 4{,}3X_3 + 3{,}2X_4 + 3{,}2X_5 + 14{,}1X_6 + 2{,}2X_7 \geq 4$
$16X_1 + 96X_2 + 9X_3 + 0{,}5X_4 + 0{,}8X_5 + 1{,}4X_6 + 0{,}5X_7 \leq 50$
$16X_1 + 81X_2 + 74X_3 + 83X_4 + 7X_5 + 14X_6 + 8X_7 \geq 26$
$22X_1 + 28X_5 + 19X_6 + 63X_7 \leq 50$

Todas las $X_1 \geq 0$
(b) Cada comida tiene un coste de 1,75$.
(c) La comida está bastante bien equilibrada (dos carnes, una verdura verde y una patata). El peso de cada ingrediente es realista.
(d) Este problema es muy sensible a la variación del precio de los alimentos.

Módulo cuantitativo C

C.2 Coste total = 2.000$. Existen múltiples soluciones óptimas. Coste después de la segunda iteración = 2.640$; después de la tercera iteración = 2.160$.

C.4 Coste óptimo = 2.570$
X-A = 50; X-C = 50; Y-B = 50; Z-B = 30; Z-C = 20; Ficticia-Z = 25

C.6 **(a)** A-1, 10; B-1, 30; C-2, 60; A-3, 40; C-3, 15
(b) 1.775$

C.8 Houston, 19.500$

C.10 Coste total = 505$

C.12 Coste inicial = 260$
Solución mejorada = 255$
Solución final = 230$

C.14 F1-W1, 1.000; F1-W4, 500; F2-W2, 2.000; F2-W3, 500; F3-W3, 1.500; F3-W4, 700; coste = 39.300$

C.16 Con East St. Louis, 60.900$; con St. Louis, 62.250$

Módulo cuantitativo D

D.2 **(a)** 44% **(d)** 0,53 min.
(b) 0,36 personas **(e)** 1,2 min.
(c) 0,8 personas

D.4 **(a)** 0,5 **(d)** 0,5
(b) 0,5 **(e)** 0,05 h.
(c) 1 **(f)** 0,1 h.

D.6 **(a)** 0,667
(b) 0,667 min.
(c) 1,33

D.8 **(a)** 0,375
(b) 1,6 h. (o 0,2 días)
(c) 0,225
(d) 0,141, 0,053, 0,020, 0,007

D.10 **(a)** 2,25
(b) 0,75
(c) 0,857 min (0,014 h)
(d) 0,64 min (0,011 h)
(e) 42%, 32%, 24%

D.12 **(a)** 6 camiones
(b) 12 min
(c) 0,857
(d) 0,54
(e) 1.728/día
(f) Sí, ahorrarían 3.096$ el primer año.

D.14 **(a)** 0,666
(b) 1,33
(c) 10 s

D.16 **(a)** 0,113 horas = 6,8 min
(b) 1,13 automóviles

D.18 **(a)** 0,05
(b) 0,743
(c) 0,793

D.20 3, 2, 4 doctores, respectivamente

D.22 Respuestas personales.

Módulo cuantitativo E

E.2 **(a)** 507 min
(b) 456 min
(c) 410 min
(d) 369 min

E.4 **(a)** 1.546 min
(b) 2.872 min
(c) 3.701 min
(d) 6.779 min

E.6 **(a)** 14,31 h
(b) 71.550$
(c) 947.250$

E.8 **(a)** 80%
(b) 3,51
(c) 3,2, 2,98, 2,81
(d) 21,5

E.10 **(a)** 72,2 h
(b) 60,55 h
(c) 41,47 h
E.12 Torri tardará 3,67 horas y Kate 2,4 horas. Ningún aprendiz llegará a una hora en la décima unidad.
E.14 748.240$ por el cuarto, 709.960$ por el quinto, 679.960$ por el sexto.
E.16 **(a)** 70 milicentavos/bit
(b) 8,2 milicentavos/bit
E.18 26.755 h
E.20 **(a)** 32,98 h, 49,61 h
(b) La cuota inicial es alta.
E.22 **(a)** Se pueden fabricar 4 barcos.
(b) Se pueden fabricar 5 barcos.
E.24 El coste total es de 908 millones de dólares.

Módulo cuantitativo F

F.2 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 2
F.4 Beneficios = 20, −15, 20, 17,50, 20; media igual a 12,50
F.6 Después de 5 minutos, hay dos cajas todavía ocupadas y una libre.
F.8

Llegadas	*Hora de llegada*	*Tiempo de servicio*	*Hora de salida*
1	11:01	3	11:04
2	11:04	2	11:06
3	11:06	2	11:08
4	11:07	1	11:09

F.10 **(a, b)**

N.º de automóviles	Prob.	Prob. acum.	Intervalo de núms. aleat.
3 o menos	0	0	—
4	0,10	0.10	de 01 a 10
5	0,15	0,25	de 11 a 25
6	0,25	0,50	de 26 a 50
7	0,30	0,80	de 51 a 80
8	0,20	1,00	de 81 a 00
9 o más	0	—	—

(c) Número medio de llegadas/hora = 105/15 = 7 coches
F.12 Cada simulación variará. Utilizando los números aleatorios de la columna derecha de la tabla de números aleatorios, leída de arriba abajo, en el orden presentado, resulta un coste de 9,20$. Este coste es mayor que el de 6,65$ del Ejemplo F3.
F.14 **(a)** 5 veces **(b)** 6,95 veces; sí **(c)** 7,16 calentadores
F.16 La demanda media es de 8,75 aproximadamente; el plazo de entrega medio es 1,86; el inventario final medio es 6,50; las ventas perdidas medias son 4,04. Los valores cambiarán utilizando series de números aleatorios distintas.
F.18 Inventario final medio = 8,92; ventas perdidas medias = 3,42; coste total = 488,568$ o 20.357$/mes. Esta nueva política parece preferible.
F.20 Aquí se presentan los intervalos de números aleatorios para los dos primeros departamentos. Los intervalos de números aleatorios corresponden a la probabilidad de ocurrencia.

Desde	Hasta	Intervalo de N.A.
Examen inicial	Rayos X	01-45
	Quirófano	46-60
	Observac.	61-70
	Administración	71-00

Desde	Hasta	Intervalo de N.A.
Rayos X	Quirófano	01-10
	Enyesado	11-35
	Observac.	36-70
	Administración	71-00

Cada simulación producirá resultados diferentes. Alguna mostrará incluso que una persona entra dos veces en rayos X.
F.22 **(a)** Beneficio = 30 (precio de venta) – 1.250$ – 36 (coste del ingrediente 2)
(b) Beneficio esperado = 7,924$/día
(d) Beneficio esperado de la simulación = 7,770$/día

1.er Tutorial del CD

T1.2 5,45; 4,06
T1.4 0,2743; 0,5
T1.6 0,1587; 0,2347; 0,1587
T1.8 **(a)** 0,0548;
(b) 0,6554;
(c) 0,6554;
(d) 0,2119

2.º Tutorial del CD

T2.2

Fracción de defectuosos	Media de Poisson	$P(x \le 1)$
0,01	0,05	0,999
0,05	0,25	0,974
0,10	0,50	0,910
0,30	1,50	0,558
0,60	3,00	0,199
1,00	5,00	0,040

T2.4 El plan no satisface ni las necesidades del productor ni las del cliente.

3.er Tutorial del CD

T3.2 **(a)** $x_1 + 4x_2 + s_1 = 24$
$x_1 + 2x_2 + s_2 = 16$
(b) Véanse los pasos en el tutorial.

(c) Segunda tabla:

c_j	Mix	x_1	x_2	s_1	s_2	Qty.
9	x_2	0,25	1	0,25	0	6
0	s_2	0,50	0	−0,50	1	4
	z_j	2,25	9	2,25	0	54
	$c_j - z_j$	0,75	0	−2,25	0	

(d) $x_1 = 8$, $x_2 = 4$, Beneficio = 60$

T3.4 Base de la primera tabla:

$A_1 = 80$
$A_2 = 75$

Base de la segunda tabla:

$A_1 = 55$
$x_1 = 25$

Base de la tercera tabla:

$x_1 = 14$
$x_2 = 33$

Coste = 221 en la solución óptima

T3.6 **(a)** x_1
(b) A_1

4.º Tutorial del CD

T4.2 Coste = 980 $; 1-A = 20; 1-B = 50; 2-C = 20; Ficticio-2 = 30; 3-A = 20; 3-C = 40

T4.4 Total = 3.100 millas; Morgantown–Coaltown = 35; Youngstown–Coal Valley = 30; Youngstown–Coaltown = 5; Youngstown–Coal Junction = 25; Pittsburgh–Coaltown = 5; Pittsburgh–Coalsburg = 20

T4.6 **(a)** Utilizando el VAM, coste = 635; A-Y = 35; A-Z = 20; B-W = 10; B-X = 20; B-Y = 15; C-W = 30.

(b) Utilizando el MODI, el coste es también 635 (es decir, la solución inicial era óptima). Una solución *alternativa* óptima es A-X = 20; A-Y = 15; A-Z = 20; B-W = 10; B-Y = 35; C-W = 30.

5.º Tutorial del CD

T5.2 **(a)** $I_{13} = 12$
(b) $I_{35} = 7$
(c) $I_{51} = 4$

T5.4 **(a)** Ruta: 1-2-4-5-7-6-8-3-1; 37,9 mi.
(b) Ruta: 4-5-7-1-2-3-6-8-4; 39,1 mi.

T5.6 Vehículo 1: Ruta 1-2-4-3-5-1 = 134$
Vehículo 2: Ruta 1-6-10-9-8-7-1 = 188$

T5.8 A continuación se muestra la matriz de costes:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	—	107.26	118.11	113.20	116.50	123.50	111.88	111.88
2		—	113.53	111.88	118.10	125.30	116.50	118.10
3			—	110.56	118.70	120.50	119.90	124.90
4				—	109.90	119.10	111.88	117.90
5					—	111.88	106.60	118.50
6						—	111.88	123.50
7							—	113.20
8								—

Índice analítico

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

LL

M

R

S

T

U

V

W

Z